



João Filipe Abelho Isabel

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Avaliação do Comportamento Dinâmico de uma Chaminé de Equilíbrio

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor Luís Miguel Chagas da Costa Gil, Professor Auxiliar, FCT-UNL

Júri:

Presidente: José Manuel Paixão Conde, Professor Auxiliar, FCT-UNL

Arguente: João Maria Matos Lopes da Fonseca, Professor Auxiliar, FCT-UNL

Vogal: Luís Miguel Chagas da Costa Gil, Professor Auxiliar, FCT-UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março de 2015



João Filipe Abelho Isabel

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Avaliação do Comportamento Dinâmico de uma Chaminé de Equilíbrio

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor Luís Miguel Chagas da Costa Gil, Professor Auxiliar, FCT-UNL

Júri:

Presidente: José Manuel Paixão Conde, Professor Auxiliar, FCT-UNL

Arguente: João Maria Matos Lopes da Fonseca, Professor Auxiliar, FCT-UNL

Vogal: Luís Miguel Chagas da Costa Gil, Professor Auxiliar, FCT-UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março de 2015

Direito de Cópia

Avaliação do Comportamento Dinâmico de uma Chaminé de Equilíbrio

Copyright © João Filipe Abelho Isabel, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço ao Professor Luís Miguel Chagas da Costa Gil, pelo apoio prestado ao longo da realização desta dissertação.

Um agradecimento especial aos meus pais pela educação que me deram, pelos valores que me transmitiram e por me terem dado a possibilidade de aceder a este nível de ensino.

Quero também agradecer à minha irmã, Joana, pelo apoio que sempre me deu.

Agradeço os meus avós pela inspiração que representam para mim.

Por fim, quero agradecer aos meus amigos e colegas de curso que sempre me acompanharam e apoiaram ao longo deste percurso académico.

Resumo

As alterações ao escoamento dão origem a transitórios, caracterizados pela variação temporal da velocidade e da pressão ao longo da conduta. No contexto das instalações hidráulicas é de extrema importância quantificar as pressões máximas e mínimas resultantes do regime transitório para poder proceder ao correcto dimensionamento das condutas e se necessário introduzir dispositivos de protecção do sistema.

Neste trabalho estudam-se as chaminés de equilíbrio caracterizando o seu efeito no amortecimento do fenómeno transiente. Para simular numericamente sistemas típicos foi utilizado um código numérico baseado no método das características.

As instalações simuladas foram escolhidas de forma a estudar separadamente a influência da área transversal da chaminé, da existência de câmaras e de uma perda de carga.

Os resultados obtidos permitiram concluir que o contínuo aumento de área da chaminé deixa de ser viável do ponto de vista económico por não representar um amortecimento significativo das variações de pressão, sendo a inclusão de câmaras de expansão e alimentação na chaminé uma melhor solução. O estudo da perda de carga permitiu propor um método para otimizar a perda de carga simétrica óptima para uma dada instalação. O mesmo tipo de metodologia permitiu obter uma melhor solução por inclusão de perda de carga assimétrica.

Palavras-chave: Escoamento transitório, instalações hidráulicas, chaminé de equilíbrio, método das características.

Abstract

The changes in a flow results in transients, characterized by the temporal variation of speed and pressure along the conduct. In the context of hydraulic installations it's extremely important to quantify the maximum and minimum pressures in the transient flow in order to proceed to a correct design of the conducts and if necessary introduce protection devices in the system.

In this text were studied surge tanks characterizing their effect in damping the transient phenomena. To numerically simulate typical systems was used a numerical code based on the characteristics method.

The installations considered were chosen in order to study separately the influence of the variation of the surge tank cross sectional area, the existence of galleries and a loss of load.

The results concluded that a continuous increase of the surge area isn't viable from an economical point of view because it doesn't represent a significant damping of the pressure variations, being the inclusion of an upper and lower galleries in the surge tank a better solution. The study of the loss of load allowed to propose a method to optimize the symmetric loss of load for the plant considered. The same method allowed to obtain a better solution by including an asymmetric loss of load.

Keywords: Transient flow, hydraulic installations, surge tank, characteristics method.

Índice

Direito de Cópia.....	i
Agradecimentos.....	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice	ix
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia.....	xv
1. Introdução.....	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objectivos.....	1
1.3 Estrutura	2
2 Revisão Bibliográfica.....	3
2.1 Definição do Estudo	3
2.2 Teorias clássicas.....	10
2.3 Método Analítico de Resolução.....	12
2.3.1 Modelo de Coluna Rígida.....	12
2.3.2 Modelo de Coluna Elástica.....	14
2.4 Equações Fundamentais do Golpe de Aríete	14
2.4.1 Equação da Continuidade	15
2.4.2 Equação da Quantidade de Movimento.....	17
2.5 Modelo Analítico de uma Chaminé de Equilíbrio	19
2.5.1 Estabilidade de Chaminés de Equilíbrio.....	20
2.5.1.1 Instabilidade devido a oscilações de pequenas amplitudes	20
2.5.1.2 Instabilidade devido a oscilações de grandes amplitudes	21
2.5.2 Perda de carga numa chaminé de equilíbrio	22
2.6 Método das Características.....	24
2.6.1 Base Teórica do Método	24
2.6.2 Condições Fronteira	26
2.6.2.1 Reservatórios	26
2.6.2.2 Válvulas	26
2.6.2.3 Chaminé de Equilíbrio	28
3 Código Numérico.....	31
3.1 Validação de Procedimentos.....	32
3.1.1 Conduta Simples	32
3.1.2 Conduta com atrito	36
3.1.3 Chaminé de Equilíbrio sem perdas de carga	36
3.1.4 Chaminé de Equilíbrio considerando condutas com atrito.....	38

4	Resultados.....	43
4.1	Instalação Simulada	43
4.2	Influência da variação da área da chaminé	46
4.3	Influência da existência de câmaras na chaminé	47
4.4	Influência de uma perda de carga.....	50
4.4.1	Perda de carga simétrica.....	50
4.4.2	Perda de carga assimétrica.....	58
5	Conclusões.....	61
6	Bibliografia	63

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Envolvente de pressão para um fecho lento da válvula [1]	4
Figura 2.2 - Envolvente de pressão para um fecho instantâneo da válvula [1]	4
Figura 2.3 - Envolvente de pressão para um fecho rápido da válvula [1]	5
Figura 2.4 - Evolução temporal da perturbação na conduta (adaptado de [2])	6
Figura 2.5 - Onda de pressão junto à válvula numa conduta simples (adaptado de [2])	7
Figura 2.6 - Chaminé de equilíbrio simples [2]	9
Figura 2.7 - Chaminé de equilíbrio com orifício (adaptado de [2])	9
Figura 2.8 - Chaminé de equilíbrio com galerias ou câmaras (adaptado de [2])	9
Figura 2.9 - Chaminé de equilíbrio diferencial (adaptado de [2])	10
Figura 2.10 - Reservatório unidireccional ou Reservatório de compensação (adaptado de [2]) ..	10
Figura 2.11 - Ábaco de Allievi para o aumento de pressão (adaptado de [8])	12
Figura 2.12 - Gráfico de Calame e Gaden para a variação da superfície livre de uma chaminé de equilíbrio [10]	14
Figura 2.13 - Volume de controlo considerado na equação da continuidade (adaptado de [2]) ..	15
Figura 2.14 - Volume de controlo considerado na equação da quantidade de movimento [2] ..	17
Figura 2.15 - Curvas de β em ordem a ε obtidas através de um método analítico, por Frank e por Thoma [10]	22
Figura 2.16 - Valor máximo das oscilações numa chaminé para um fecho instantâneo [10]	23
Figura 2.17 - Malha do método das características [12]	24
Figura 2.18 - Representação da chaminé (adaptado de [13])	28
Figura 2.19 - Representação da perda de carga (adaptado de [12])	29
Figura 3.1 - Conduta simples (Esquema)	32
Figura 3.2 - Evolução da cota piezométrica ao longo da instalação em regime permanente	33
Figura 3.3 - Evolução da cota piezométrica a montante da válvula	34
Figura 3.4 - Evolução da cota piezométrica a meio da conduta	35
Figura 3.5 - Evolução da cota piezométrica junto ao reservatório	35
Figura 3.6 - Evolução da cota piezométrica considerando as perdas distribuídas	36
Figura 3.7 - Chaminé de equilíbrio sem perdas (Esquema)	36
Figura 3.8 - Oscilação da altura da superfície livre da chaminé	37
Figura 3.9 - Representação esquemática da instalação da barragem do Caldeirão	38
Figura 3.10 - Oscilação da cota piezométrica na chaminé variando o tempo fecho da válvula obtido no código numérico	39
Figura 3.11 - Oscilação da cota piezométrica na chaminé variando o tempo fecho da válvula obtido por Macedo [14]	40
Figura 3.12 - Evolução da variação da cota piezométrica e do caudal volúmico na chaminé ...	41
Figura 4.1 - Esquema da instalação simulada	43
Figura 4.2 - Variação da cota piezométrica considerando uma chaminé simples	45
Figura 4.3 - Valores máximos e mínimos da variação da cota piezométrica em função do diâmetro da chaminé	46

Figura 4.4 – Esquema de uma chaminé com câmaras.....	47
Figura 4.5 - Variação da cota piezométrica, chaminé simples e com câmara de expansão	48
Figura 4.6 - Variação da cota piezométrica, chaminé simples e com câmara de alimentação ..	48
Figura 4.7 - Variação da cota piezométrica, chaminé simples e com câmara de expansão e alimentação	49
Figura 4.8 - Variação da cota piezométrica para $C_D A_O = 0,1$	50
Figura 4.9 - Variação da cota piezométrica para $C_D A_O = 0,2$	51
Figura 4.10 - Variação da cota piezométrica para $C_D A_O = 0,3$	51
Figura 4.11 - Variação da cota piezométrica para $C_D A_O = 0,4$	52
Figura 4.12 - Variação da cota piezométrica para $C_D A_O = 0,5$	52
Figura 4.13 - Variação da cota piezométrica para $C_D A_O = 0,6$	53
Figura 4.14 - Variação da cota piezométrica para $C_D A_O = 0,7$	53
Figura 4.15 - Variação da cota piezométrica para $C_D A_O = 0,8$	54
Figura 4.16 - Variação da cota piezométrica para $C_D A_O = 0,9$	54
Figura 4.17 - Variação da cota piezométrica para $C_D A_O = 1$	55
Figura 4.18 - Variação da cota piezométrica para $C_D A_O = 2$	55
Figura 4.19 - Sobrepressão máxima em função da perda de carga.....	56
Figura 4.20 – Variação da cota piezométrica para a perda de carga ótima $C_D A_O = 0.83$	57
Figura 4.21 - Influência da perda de carga no tempo de estabilização do sistema.....	57
Figura 4.22 - Variação da cota piezométrica para perda de carga assimétrica com $C_D = 0.3$ de saída.....	58
Figura 4.23 - Variação da cota piezométrica para perda de carga assimétrica com $C_D = 0.2$ de saída.....	59
Figura 4.24 - Depressão máxima em função da perda de carga.....	59
Figura 4.25 - Variação da cota piezométrica para uma perda de carga assimétrica ótima.....	60

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Reservatórios (conduta simples)	32
Tabela 3.2 - Condutas (conduta simples)	32
Tabela 3.3 - Válvula (conduta simples)	32
Tabela 3.4 - Fluído (conduta simples)	33
Tabela 3.5 - Conduta (chaminé de equilíbrio sem perdas)	36
Tabela 3.6 - Chaminé (chaminé de equilíbrio sem perdas)	37
Tabela 3.7 - Reservatórios (chaminé com condutas com atrito)	38
Tabela 3.8 - Condutas (chaminé com condutas com atrito)	38
Tabela 3.9 - Chaminé (chaminé com condutas com atrito)	38
Tabela 3.10 - Fluído (chaminé com condutas com atrito)	38
Tabela 3.11 - Válvula (chaminé com condutas com atrito)	39
Tabela 3.12 - Comparação dos valores máximos e mínimos da variação da cota piezométrica	40
Tabela 4.1 - Reservatórios (instalação simulada)	44
Tabela 4.2 - Condutas (montagem simulada)	44
Tabela 4.3 - Chaminé (montagem simulada)	44
Tabela 4.4 - Fluído (montagem simulada)	44
Tabela 4.5 - Válvula (montagem simulada)	44
Tabela 4.6 - Chaminé (chaminé com câmaras)	47

Simbologia

α - Celeridade da onda de pressão
 A - Área transversal da conduta
 A_o - Área do orifício
 A_s - Área transversal da chaminé
 A_{Th} - Área da chaminé calculada pelo critério de Thoma
 B - Impedância característica da tubagem
 C_d - Coeficiente de descarga do orifício
 C_v - Coeficiente de descarga da válvula
 d - Diâmetro do orifício
 D - Diâmetro da conduta
 e - Espessura da parede da conduta
 E - Módulo da elasticidade do material da conduta
 f - Factor de atrito de Darcy-Weisbach
 F_{p1} - Força aplicada na superfície 1 do volume de controlo
 F_{p2} - Força aplicada na superfície 2 do volume de controlo
 F_{p12} - Força aplicada na superfície lateral do volume de controlo
 F_s - Força de atrito
 F_{wx} - Componente da força gravítica no eixo da conduta
 F_{r0} - Parâmetro adimensional referente às perdas de carga na conduta
 g - Aceleração gravítica
 h_f - Perda de carga na conduta
 h_{or} - Perda de carga no orifício
 H - Cota piezométrica
 H_R - Cota piezométrica no reservatório
 K - Compressibilidade volumétrica do fluido
 L - Comprimento da conduta
 n - Coeficiente de segurança
 N - Número de nós na conduta
 Q - Caudal volúmico
 Q_s - Caudal volúmico na chaminé
 R - Coeficiente de resistência da tubagem

t - Tempo

t_f - Tempo de manobra da válvula

T_* - Período das oscilações na chaminé sem perdas de carga

V - Velocidade do escoamento

x - Variável associada à secção da conduta

z - Cota da superfície livre da chaminé

z_d - Parâmetro adimensional referente à depressão máxima na chaminé

z_m - Parâmetro adimensional referente à sobrepressão máxima na chaminé

Z_* - Amplitude das oscilações na chaminé sem perdas de carga

ΣF - Somatório de forças

ΔH - Variação da cota piezométrica

ΔP - Variação de pressão

ΔV - Variação da velocidade do escoamento

Δt - Discretização temporal do sistema

Δx - Discretização espacial do sistema

β - Parâmetro de Voigt

ε - Parâmetro de Voigt

θ - Inclinação da conduta

θ^* - Parâmetro adimensional de Allievi para as características de fecho da válvula

ρ - Massa volúmica

ρ^* - Parâmetro adimensional de Allievi para a energia cinética do fluído

τ - Parâmetro de abertura ou de fecho da válvula

τ_0 - Tensão de corte

ψ - Parâmetro referente às características elásticas da tubagem e do seu suporte

0 - Índice referente às variáveis em regime permanente

i - Índice referente ao passo de tempo de cálculo

$i - 1$ - Índice referente ao passo de tempo anterior

$i + 1$ - Índice referente ao passo de tempo seguinte

1. Introdução

1.1 Motivação

O estudo de sistemas hidráulicos com condutas em pressão quando sujeitos a regimes transitórios é de extrema importância, uma vez que a ocorrência do golpe de aríete pode comprometer toda a estrutura constituinte do sistema hidráulico. É então necessário quantificar as pressões extremas durante a ocorrência deste fenómeno para serem dimensionados dispositivos de protecção que atenuem essas elevadas variações de pressão.

A escolha de uma chaminé de equilíbrio como tema desta dissertação é justificada pela sua frequente utilização como dispositivo de protecção em sistemas hidráulicos e também pela existência de códigos numéricos que permitem efectuar um estudo preciso de forma a otimizar o seu dimensionamento.

1.2 Objectivos

Nesta dissertação apresentam-se diversas simulações de sistemas hidráulicos, com o objectivo de caracterizar o funcionamento de uma chaminé de equilíbrio.

Foi então estudada a influência da variação da área transversal, da inclusão de câmaras e da existência de uma perda de carga na conduta de ligação. A análise dos resultados permite então propor uma metodologia de forma a otimizar o dimensionamento de uma chaminé de equilíbrio, nomeadamente a área da chaminé e a perda de carga.

Do ponto de vista pessoal, esta dissertação tem o objectivo de adquirir conhecimentos na área da simulação de sistemas hidráulicos.

1.3 Estrutura

A dissertação encontra-se distribuída em cinco capítulos:

1. Introdução
2. Revisão Bibliográfica
3. Código Numérico
4. Resultados
5. Conclusão

No primeiro capítulo faz-se uma introdução ao tema identificando os fenómenos que tornam necessária a implementação de chaminés de equilíbrio e uma breve descrição das mesmas.

No segundo capítulo é realizada uma síntese do estudo dos regimes transitórios em sistemas hidráulicos e em chaminés de equilíbrio e é feita a apresentação das equações que regem este tipo de problemas. Estas equações são então resolvidas pelo método das características tendo em conta as condições fronteira descritas neste capítulo.

No terceiro capítulo procede-se à validação de procedimentos, ao efectuar simulações e comparando os resultados com os obtidos analiticamente ou com resultados obtidos por outros autores.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos nesta dissertação relativos à influência da secção da chaminé, e se esta possuiu secção variável, estuda-se ainda o efeito da existência de uma perda de carga na conduta de ligação.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões resultantes da análise dos resultados expostos nos capítulos anteriores e trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Definição do Estudo

Os sistemas hidráulicos são dimensionados para operar em regime permanente, quando sofrem alterações nas condições de funcionamento ocorrem regimes transitórios. As alterações podem ser provocadas pelo arranque ou paragem de bombas e turbinas, pelo fecho voluntário de válvulas ou pelo fecho de válvulas devido a acidente. Como resultado dessas alterações surge o fenómeno do golpe de aríete que não é mais que um fenómeno de propagação de ondas de pressão a alta velocidade ao longo do sistema hidráulico.

Os valores extremos das ondas de pressão resultantes do golpe de aríete podem ser suficientemente altos ou baixos que danifiquem as estruturas que formam todo o sistema hidráulico, pelo que o seu conhecimento permite dimensionar condutas que suportem os esforços correspondentes ou seleccionar dispositivos de protecção que atenuem os efeitos do golpe de aríete.

A modelação do escoamento no sistema hidráulico tem como fundamento teórico as equações da continuidade e da quantidade de movimento. Através da resolução destas duas equações diferenciais é possível determinar os valores de pressão e do caudal em função do instante de tempo e da posição na conduita.

Para análises mais simples de regimes transitórios, sem grandes amplitudes de pressão, é considerado o modelo de coluna rígida, ou oscilação de massa, no qual a capacidade do fluído e das paredes das condutas armazenarem energia através das suas propriedades elásticas é desprezada. É então considerado que o fluído se comporta como um corpo rígido que se desloca no interior da conduita.

Para análises mais complexas é considerado o modelo de coluna elástica no qual a elasticidade da conduita e a compressibilidade do fluído sujeitas às alterações de pressão são tidas em conta na análise do regime transitório, através da celeridade da onda de pressão, a .

Para caracterizar a onda de pressão é necessário saber qual o tempo de manobra do dispositivo que provoca o regime transitório, nesta dissertação será considerado o fecho de uma

válvula como responsável pelo golpe de ariete. Os extremos da conduta funcionam como “obstáculo” à propagação da onda, pelo que a onda propaga-se desde a válvula até encontrar um reservatório, onde se reflecte e propaga-se no sentido contrário. Sendo t_f o tempo de manobra da válvula e L o comprimento da tubagem, a manobra pode ser classificada como:

- Lenta, se $t_f > 2L/a$, a onda é reflectida e regressa à válvula enquanto esta ainda não se encontra totalmente fechada;

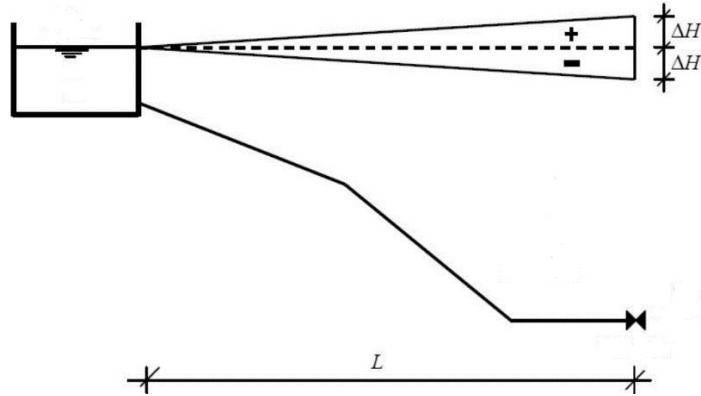


Figura 2.1 - Envolvente de pressão para um fecho lento da válvula [1]

Para um fecho lento, como o tempo de manobra é superior ao período da onda, a amplitude da variação de pressão é dependente do tempo de fecho. O valor máximo de variação de pressão é dado por,

$$\Delta H = \pm \frac{V_0}{g} \frac{2L}{t_f} \quad (2.1)$$

Sendo g a aceleração gravítica e V_0 a velocidade em regime permanente.

A envolvente de pressão representada na figura 2.1 é então linear, variando entre zero junto ao reservatório e o valor máximo junto à válvula.

- Instantânea, se $t_f = 0$;

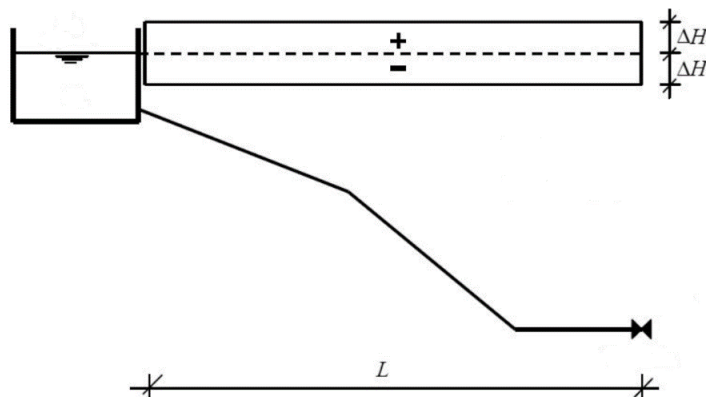


Figura 2.2 - Envolvente de pressão para um fecho instantâneo da válvula [1]

Para uma manobra instantânea, o valor da amplitude da onda de pressão representado na figura 2.2 é dado pela fórmula de Joukowski,

$$\Delta H = \pm \frac{V_0 a}{g} \quad (2.2)$$

Se o tempo de manobra for inferior ao tempo que a onda demora a regressar à válvula esta é considerada uma manobra rápida.

- Rápida, se $t_f < 2L/a$, a onda é reflectida e regressa à válvula quando esta já se encontra totalmente fechada;

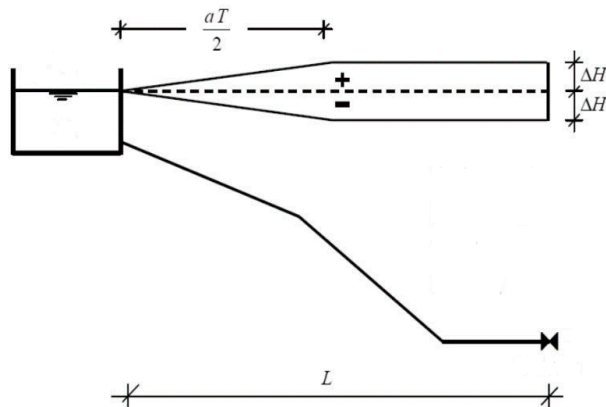


Figura 2.3 - Envolvente de pressão para um fecho rápido da válvula [1]

Para um fecho rápido, a amplitude da onda de pressão é calculada, tal como para um fecho instantâneo, pela fórmula de Joukowski. A diferença entre as duas manobras é que para um fecho rápido nem toda a conduta fica sujeita ao valor máximo da variação de pressão, sendo que entre o reservatório e uma distância $a * t_f/2$ a pressão varia entre zero e o valor máximo ΔH , tal como representado na figura 2.3.

Considerando uma manobra instantânea e assumindo a ausência de dissipação, a evolução temporal da perturbação na tubagem é representada na figura 2.4.

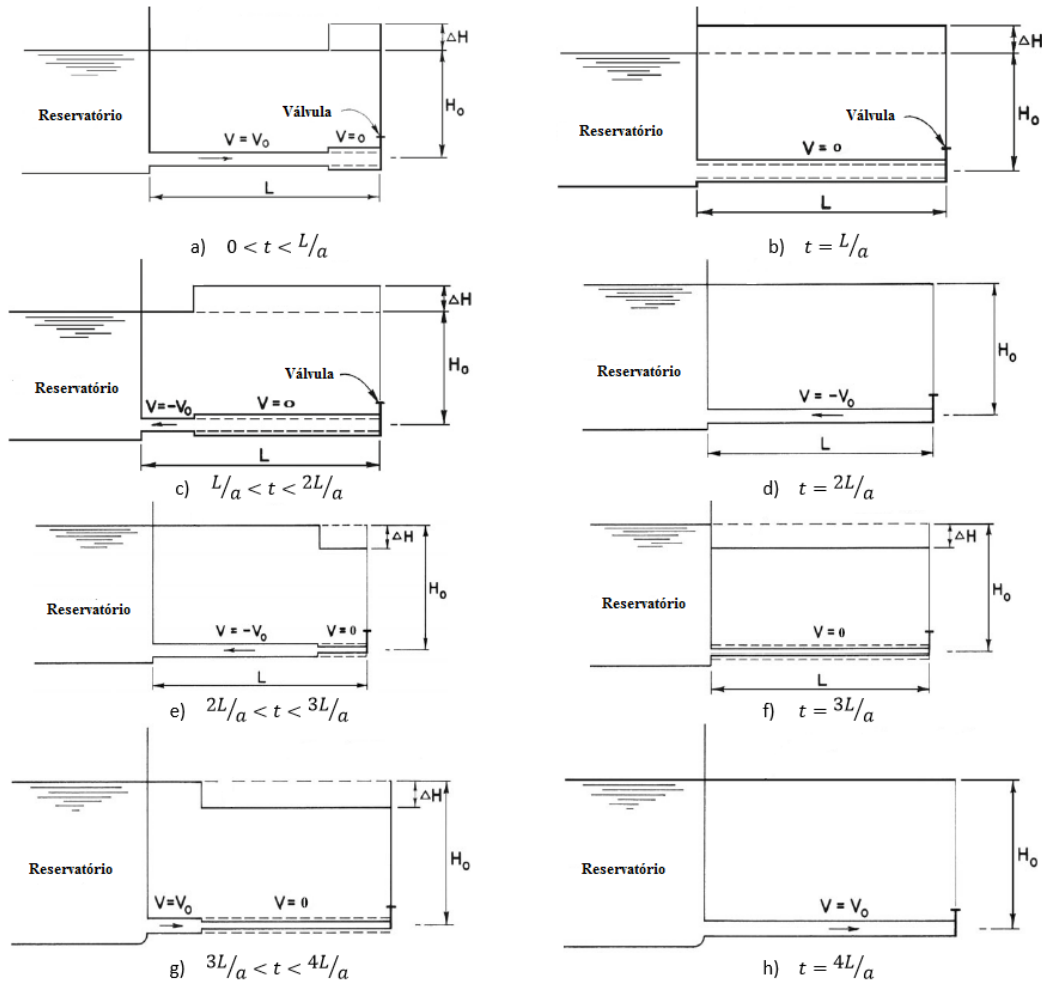


Figura 2.4 - Evolução temporal da perturbação na conduta (adaptado de [2])

Ao ocorrer o fecho da válvula a velocidade do escoamento diminui de V_0 até zero o que provoca um aumento de pressão na válvula, de valor ΔH . Ocorre então a propagação de uma onda de pressão com velocidade a em direcção ao reservatório, figura 2.4 a). No instante $t = L/a$, a frente da onda de pressão atinge o reservatório, a velocidade do escoamento em toda a conduta é zero e a pressão em toda a conduta é de $H_0 + \Delta H$, figura 2.4 b).

Ao atingir o reservatório, que se encontra a uma pressão inferior à conduta, gera-se um escoamento no sentido contrário. Devido à diferença de pressão entre o reservatório e a conduta, o escoamento desloca-se da conduta para o interior do reservatório com velocidade $-V_0$, figura 2.4 c). No instante $t = 2L/a$, a frente da onda de pressão atinge a válvula sendo que a pressão em toda a conduta é de H_0 e a velocidade do escoamento é $-V_0$, figura 2.4 d).

Após atingir a válvula propaga-se uma depressão no sentido do reservatório, passando a pressão a assumir o valor de $H_0 - \Delta H$ e a velocidade do escoamento passa de $-V_0$ para zero, figura 2.4 e). A frente da onda atinge o reservatório no instante $t = 3L/a$, sendo que a pressão em toda a conduta é de $H_0 - \Delta H$ e a velocidade do escoamento é nula, figura 2.4 f).

Após a frente da onda atingir o reservatório ocorre um diferencial de pressões uma vez que a pressão no reservatório é superior à da conduta, isso faz com que ocorra um novo escoamento desta vez no sentido da válvula com velocidade V_0 e à pressão do reservatório H_0 , figura 2.4 g). A onda de pressão atinge então a válvula no instante $t = 4L/a$ sendo a velocidade

do escoamento V_0 e a pressão H_0 , figura 2.4 h). Estes eventos repetem-se então com um período de $4L/a$.

A onda de pressão para uma conduta simples considerando uma manobra rápida é então representada pela figura 2.5:

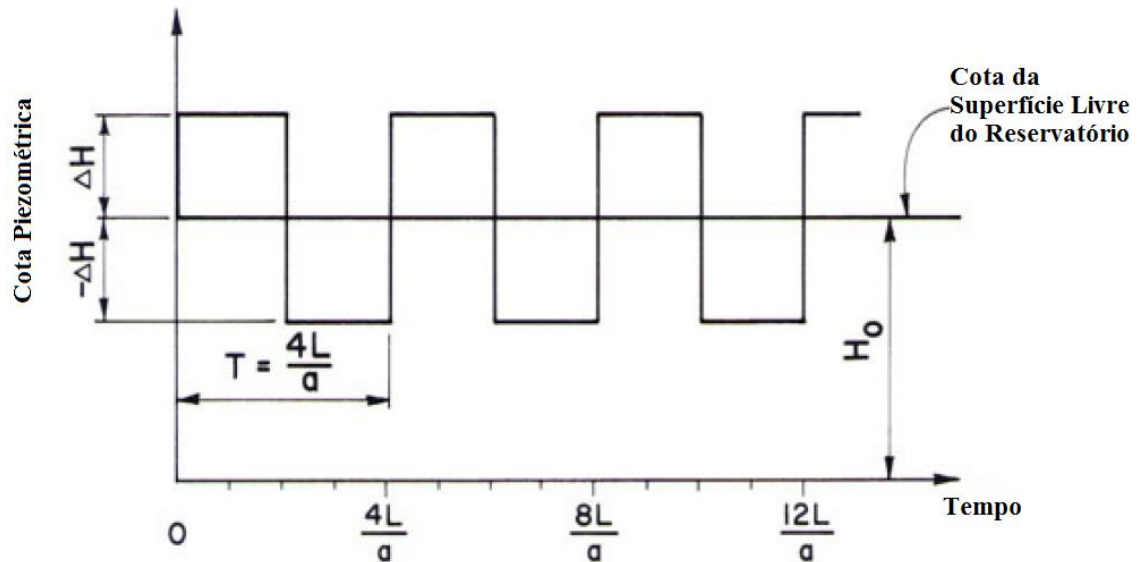


Figura 2.5 - Onda de pressão junto à válvula numa conduta simples (adaptado de [2])

A duração do intervalo de tempo a que a conduta está sujeita a cada sobrepressão ou depressão é dada por $t = 2(L - x)/a$, sendo x a distância entre a secção onde se avalia a pressão e a válvula. À medida que se consideram secções mais próximas do reservatório, o intervalo de tempo a que essa secção da conduta está sujeita entre cada sobrepressão e depressão vai diminuindo até à situação limite junto ao reservatório em que a secção está apenas sujeita a picos de pressão.

Uma vez que a existência de regimes transitórios é inevitável, é necessário que na fase de projecto sejam estabelecidas condições de segurança para as operações de manobra dos equipamentos, tais como a abertura e o fecho de válvulas e o início e paragem de bombas ou turbinas. A análise das condições do regime transitório e das conseqüentes pressões extremas permite identificar se há necessidade de instalação de dispositivos de protecção. [3]

A aplicação, operação e manutenção dos dispositivos de protecção de sistemas hidráulicos têm um custo associado elevado, a escolha deve passar por aquele que se apresentar como o mais eficiente na protecção contra as pressões extremas e mais económico. [4]

Os dispositivos de protecção mais utilizados são:

- Chaminé de equilíbrio;
- Reservatório unidireccional
- Reservatório hidropneumático;
- Volante de inércia;
- Sistemas de by-pass às bombas ou turbinas;
- Válvula de controlo;
- Ventosas;

Neste trabalho o dispositivo de protecção considerado foi a chaminé de equilíbrio.

A chaminé de equilíbrio é um dispositivo com a forma de um reservatório aberto, no qual a água se encontra em contacto directo com a atmosfera, que permite reduzir os efeitos do transitório ao armazenar ou ceder água à conduta que se pretende proteger.

Ao atingir a chaminé de equilíbrio, a energia da massa de água em movimento na conduta provoca uma subida na altura da superfície livre da chaminé até atingir um valor máximo, nesse ponto a energia cinética da água é transformada em energia potencial e acumulada na chaminé de equilíbrio. Durante a fase da redução da pressão o amortecimento é conseguido através da alimentação da conduta a partir da chaminé. Numa situação de arranque do sistema, a chaminé de equilíbrio assume também o papel de reservatório auxiliar.

A chaminé de equilíbrio permite assim uma maior rapidez de manobra dos órgãos de controlo, o que possibilita uma rápida retoma da operacionalidade do sistema e reduz também o perigo da formação de pressões negativas e o consequente risco de cavitação no sistema hidráulico em que é instalada. [1]

De forma a garantir que a chaminé de equilíbrio funciona de uma forma eficiente, na fase de dimensionamento devem ser tidas em conta as seguintes considerações:

- A chaminé de equilíbrio deve ter uma secção suficiente de forma a evitar que uma pequena alteração no escoamento, a alteração da velocidade de uma turbina por exemplo, provoque um fenómeno de ressonância na chaminé de equilíbrio.
- A chaminé de equilíbrio deve ser colocada o mais próxima possível da componente do sistema hidráulico responsável pelo transitório.
- A chaminé de equilíbrio deve ter uma altura suficiente de forma a prevenir que a água na chaminé não transborde.
- A base da chaminé deve ser baixa o suficiente de forma a garantir que durante a operação não ocorra a admissão de ar no sistema. [5]

As oscilações da superfície livre na chaminé são amortecidas pelas perdas de carga devido ao atrito, pelo que uma das formas de aumentar esse amortecimento passa pela criação de perdas de carga na própria chaminé através da alteração da sua forma. Existem então vários tipos de chaminés de equilíbrio.

Na figura 2.6 está representada uma chaminé de equilíbrio simples. Este tipo de chaminé é pouco utilizada porque como não possui perda de carga na ligação à conduta, isso implica que tenha maiores dimensões e consequentemente um custo de construção superior.

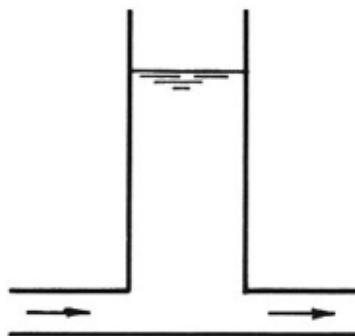


Figura 2.6 - Chaminé de equilíbrio simples [2]

Na figura 2.7 está representada uma chaminé de equilíbrio com orifício. Este tipo de chaminé é caracterizada pela existência de uma perda de carga na base da chaminé o que provoca uma redução da amplitude das oscilações da superfície livre da chaminé.



Figura 2.7 - Chaminé de equilíbrio com orifício (adaptado de [2])

Na figura 2.8 está representada uma chaminé de equilíbrio com galerias ou câmaras. Este tipo de chaminé é caracterizado pela existência de galerias horizontais ligadas ao poço principal da chaminé de equilíbrio, a existência dessas galerias promovem o amortecimento das oscilações através do aumento de inércia associado às galerias. Muitas vezes as galerias correspondem a túneis utilizados durante a construção da chaminé.

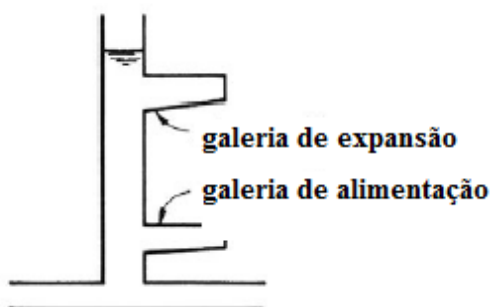


Figura 2.8 - Chaminé de equilíbrio com galerias ou câmaras (adaptado de [2])

Na figura 2.9 está representada uma chaminé de equilíbrio diferencial. Este tipo de chaminé caracteriza-se pela existência de duas câmaras separadas sendo que consiste num poço que descarrega numa chaminé envolvente que pode estar ou não ligada à base do poço através de um orifício. [6]

Uma chaminé diferencial tem as seguintes fases de funcionamento:

1. Após a manobra do obtuador, o nível de água é superior no interior do poço devido à perda de carga no orifício de ligação da câmara exterior à conduta;
2. Depois do nível de água no poço interior atingir o valor máximo, ocorre o transbordo para a câmara exterior;
3. Quando os níveis de água se igualam nas duas câmaras, a subida do nível é similar nas duas câmaras até que o escoamento inverte o sentido e passa a sair da chaminé;
4. Devido à perda de carga no orifício, o nível do poço interior desce mais rapidamente do que o exterior, sendo por isso, alimentado através do limite superior enquanto o nível de água for superior a esse nível;

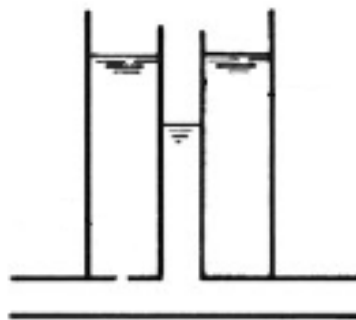


Figura 2.9 - Chaminé de equilíbrio diferencial (adaptado de [2])

O reservatório unidireccional, representada na figura 2.10, é utilizada em situações em que apenas é necessário amortecer ou as sobrepressões ou as depressões. devido à depressão possa ocorrer cavitação na conduta. Na conduta que liga a chaminé à conduta principal existe uma válvula de retenção que apenas abre quando ocorre a depressão.

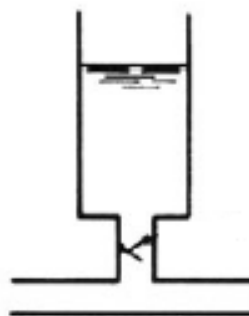


Figura 2.10 - Reservatório unidireccional ou Reservatório de compensação (adaptado de [2])

2.2 Teorias clássicas

O começo do estudo dos fenómenos transitórios em condutas data do início do século XIX quando Young investigou a propagação de ondas de pressão nas mesmas. Na mesma altura Helmholtz conseguiu relacionar a diminuição da velocidade das ondas de pressão no interior de um tubo com a elasticidade das paredes da tubagem, ao comparar um escoamento confinado a um escoamento não confinado.

No ano de 1866, Weber estudou um escoamento incompressível numa tubagem elástica o que lhe permitiu determinar a velocidade das ondas de pressão e desenvolver as equações da massa e da quantidade de movimento.

Em 1878, Korteweg foi o primeiro a estudar um escoamento tendo em conta tanto a elasticidade do fluído como das paredes da tubagem. Até então os estudos apenas tinham em conta um deles.

O estudo do golpe de ariete propriamente dito data de 1858 por Menabrea, quando este deduziu a expressão da sobrepressão, Δp originada pela variação brusca da velocidade do fluído ΔV_0 , de massa volúmica ρ , em regime permanente. Até então a constante a era tida em conta como um parâmetro de cálculo, só anos mais tarde é que viria a ser designada como a celeridade da onda de pressão na conduta. [7]

$$\Delta p = \rho \Delta V_0 a \quad (2.3)$$

No ano de 1898, Joukowski publicou o seu estudo, conhecido como teoria básica do golpe de ariete, que era fundamentado em ensaios efectuados pelo próprio no ano anterior. Assim conseguiu desenvolver uma fórmula para a velocidade de propagação da onda de pressão considerando a elasticidade da tubagem e do fluído, desenvolveu também a relação entre o aumento de pressão e a redução da velocidade do escoamento e descreveu ainda os ciclos de oscilação da onda de pressão ao longo da conduta. Devido à sua dedicação ao estudo do golpe de ariete a expressão da sobrepressão anteriormente descoberta por Manabrea viria a chamar-se “fórmula de Joukowski”. [2]

Cerca de cinco anos mais tarde Allievi viria a publicar a teoria geral do golpe de ariete, na qual foram introduzidos dois parâmetros adimensionais o primeiro relaciona a energia cinética do fluído com a energia potencial quer do fluído quer das paredes da tubagem, o segundo representa as características de fecho da válvula.

$$\rho^* = \frac{aV_0}{2gH_0} \quad (2.4)$$

$$\theta^* = \frac{at_f}{2L} \quad (2.5)$$

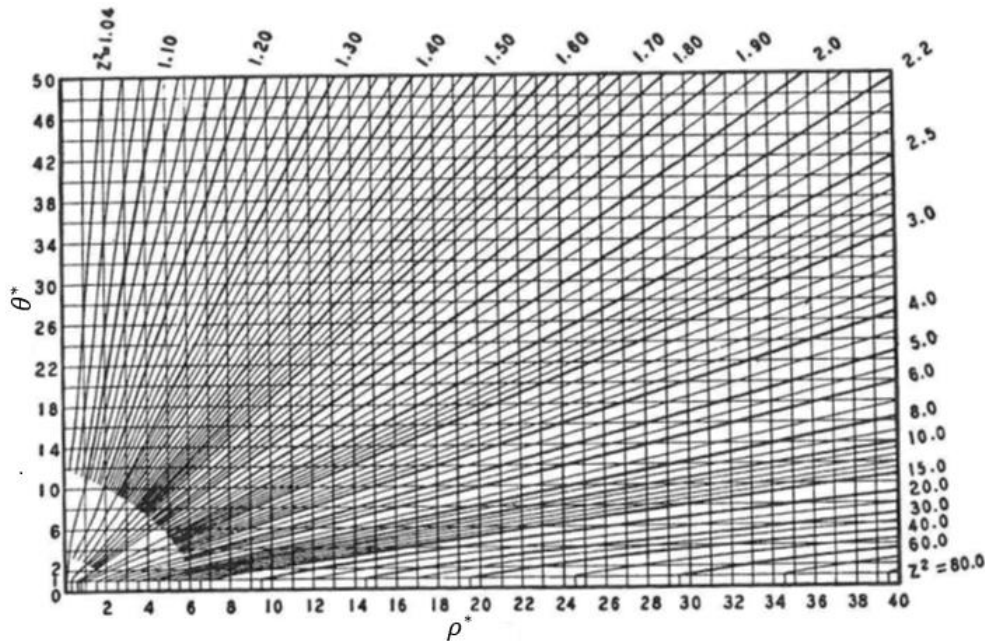


Figura 2.11 - Ábaco de Allievi para o aumento de pressão (adaptado de [8])

Allievi desenvolveu então ábacos, tal como representado na figura 2.11, para descrever o aumento de pressão junto a uma válvula e descreveu a evolução da pressão ao longo da conduta. No entanto estas ferramentas eram bastante limitadas porque tinham em consideração que a lei de fecho era uniforme e as perdas de carga distribuídas eram desprezáveis. [8]

Após esta publicação surgiram vários autores que também através de métodos gráficos viriam complementar a teoria de Allievi. Em 1926, Strowger e Kerr apresentaram uma metodologia para calcular o golpe de ariete considerando leis de fecho não uniformes. Wood em 1926 e Lowy em 1928 desenvolveram também métodos gráficos para analisar o golpe de ariete. Em 1931, Bergeron desenvolveu o método gráfico para determinar as condições em zonas intermédias da conduta. Um ano mais tarde foi Schnyder que pela primeira incluiu as perdas de carga relacionadas com o atrito no método gráfico.

Com o desenvolvimento dos computadores passou a ser possível resolver o sistema de equações diferenciais parciais que regem o escoamento transitório em condutas. Em 1967, Streeter e Wylie popularizaram a utilização do método das características como ferramenta de resolução das equações relacionadas com o golpe de ariete.

2.3 Método Analítico de Resolução

O estudo de escoamentos transitórios tem como base dois modelos analíticos:

- Modelo de coluna rígida;
- Modelo de coluna elástica

2.3.1 Modelo de Coluna Rígida

Este modelo tem por base as seguintes hipóteses simplificativas:

- Fluido incompressível;

- Condutas com paredes indeformáveis;
- Meio contínuo;
- Escoamento unidimensional

Considera-se então que as alterações ao escoamento apenas afectam os aspectos da inércia e da fricção do escoamento transitório. Dadas estas considerações pode ser demonstrado, através da equação da continuidade, que qualquer alteração no escoamento resulta em alterações instantâneas em todo o sistema uma vez que o fluido se desloca como uma massa única no interior da tubagem, originando então uma situação de oscilação de massa.

Ao considerar a massa volúmica do fluido e a secção das condutas constante, a velocidade do escoamento será também ela constante pelo que as variáveis do escoamento serão apenas dependentes do tempo o que permite resolver muito mais rapidamente as equações diferenciais que descrevem o escoamento. [9]

Um dos trabalhos baseados neste modelo foi o gráfico da figura 2.12 apresentado por Calame e Gaden que determina as três primeiras variações de pressão na superfície livre de uma chaminé de equilíbrio considerando o fecho instantâneo de uma válvula. Os parâmetros adimensionais F_{r0} , z_m e z_d correspondem a ,

$$\begin{aligned} F_{r0} &= \frac{h_f}{Z_*} \\ z_m &= \frac{Z_{\max}}{Z_*} \\ z_d &= \frac{Z_{\min}}{Z_*} \end{aligned} \tag{2.6}$$

Sendo h_f a perda de carga na conduta em regime permanente, Z_* a amplitude das oscilações da superfície livre da chaminé numa situação sem perdas devido ao atrito e Z_{\max} e Z_{\min} o máximo e o mínimo das oscilações. As escalas z_m e z_d são respectivamente para a sobrepressão e para a depressão.

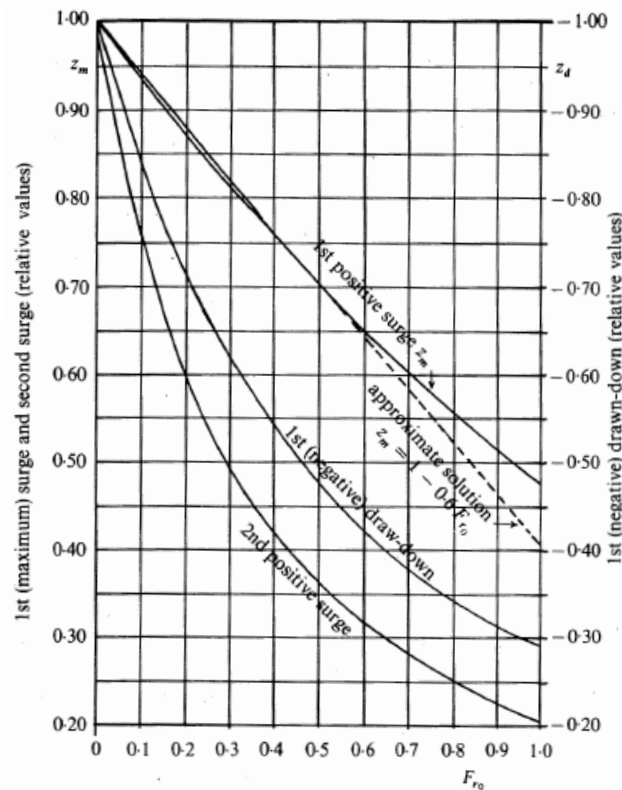


Figura 2.12 - Gráfico de Calame e Gaden para a variação da superfície livre de uma chaminé de equilíbrio [10]

Uma vez que as simplificações consideradas tornam o modelo um pouco distante da realidade física, a sua utilização apenas é aconselhável em situações em que os fenómenos transitórios são lentos, e nos quais o escoamento pode ser aproximado a uma oscilação de massa, como por exemplo no estudo da estabilidade de chaminé de equilíbrio sem perdas de carga.

2.3.2 Modelo de Coluna Elástica

Uma vez que os resultados obtidos utilizando o modelo de coluna rígida não eram precisos foi então desenvolvido o modelo de coluna elástica. Este modelo tem em consideração a capacidade do fluido e da conduta armazenarem energia através da sua compressibilidade e elasticidade sendo que a velocidade de propagação da onda de pressão dependerá destes dois factores.

O modelo é mais complexo e tem menos hipóteses simplificativas produzindo assim resultados mais precisos.

2.4 Equações Fundamentais do Golpe de Aríete

O comportamento de escoamentos transitórios considerando o modelo de coluna elástica é descrito pelas equações da continuidade e da quantidade de movimento considerando um volume de controlo deformável e que se desloca à mesma velocidade que a onda de pressão.

Para ser possível simplificar as equações da continuidade e da quantidade de movimento são feitas algumas considerações. Considera-se o escoamento como sendo unidimensional e axissimétrico. Os efeitos elásticos no fluido e na conduta são considerados pequenos, sendo que

caso ocorram deformações na conduta estas desenvolvem-se de acordo com a lei de Hooke. A conduta não apresenta variações significativas de inclinação e encontra-se totalmente cheia de fluido, sempre no estado líquido sem ocorrência de cavitação. As expressões utilizadas para o cálculo da perda de carga em regime permanente são válidas em regime transitório. Os termos convectivos da aceleração são desprezados. A dedução completa das equações pode ser consultada em [2].

2.4.1 Equação da Continuidade

De forma a obter a equação da continuidade é necessário aplicar a lei da conservação da massa num volume de controlo. Na figura 2.13 está representado o volume de controlo definido num determinado instante t . Este volume corresponde a um sistema isolado, cujo elemento líquido está situado entre duas secções fixas, transversais ao eixo da conduta e distante entre si Δx e apresenta uma deformação axial da secção transversal em função do tempo.

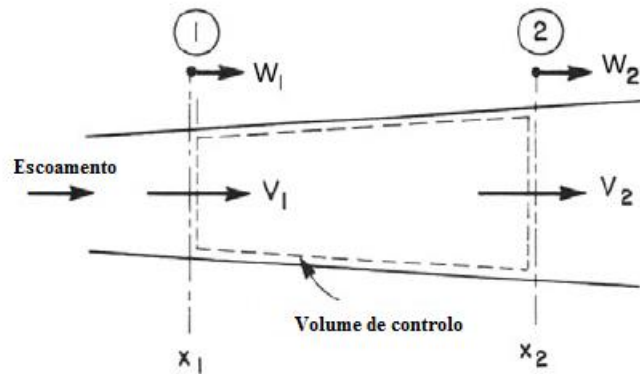


Figura 2.13 - Volume de controlo considerado na equação da continuidade (adaptado de [2])

Segundo Chaudhry a equação da continuidade para um volume de controlo deste tipo pode ser expressa por,

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} \Delta x + (\rho AV)_2 - (\rho AV)_1 = 0 \quad (2.7)$$

Sabendo que $\Delta x = x_2 - x_1$. Dividindo por Δx e fazendo tender Δx para zero, a equação 2.7 fica,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho A) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho AV) = 0 \quad (2.8)$$

Expandindo os termos entre parêntesis obtém-se,

$$A \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial A}{\partial t} + \rho A \frac{\partial V}{\partial x} + \rho V \frac{\partial A}{\partial x} + AV \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad (2.9)$$

Rearranjando os termos utilizando derivadas totais e dividindo a equação por ρA ,

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.10)$$

O primeiro termo da equação representa a compressibilidade do fluído e o segundo termo representa a elasticidade das paredes da conduta.

O módulo da compressibilidade volumétrica do fluído K é expressa por

$$K = \frac{dp}{d\rho/\rho} \quad (2.11)$$

Esta equação pode escrita da seguinte forma,

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{K} \frac{dp}{dt} \quad (2.12)$$

Sendo E o módulo de elasticidade do material da conduta, e a espessura da parede da conduta e D o seu diâmetro,

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \frac{D}{eE} \frac{dp}{dt} \quad (2.13)$$

Substituindo as duas equações anteriores na equação 2.10,

$$\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{K} \left(1 + \frac{1}{\frac{eE}{DK}} \right) \frac{dp}{dt} = 0 \quad (2.14)$$

A celeridade de um sistema é representada por

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho \left[1 + \left(\frac{K}{E} \right) \psi \right]}} \quad (2.15)$$

O coeficiente ψ é função das características elásticas e do tipo de apoio da conduta. A situação mais recorrente de analisar é a de uma conduta elástica de parede fina, onde ψ é dado por

$$\psi = \frac{D}{e} \quad (2.16)$$

Substituindo a equação 2.15 na equação 2.14 e transformando as derivadas totais em derivadas parciais,

$$\frac{\partial p}{\partial t} + V \frac{\partial p}{\partial x} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.17)$$

Tal como referido anteriormente os termos convectivos da aceleração são pequenos pelo que podem ser desprezados. A equação da continuidade fica então,

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.18)$$

Visto que estas equações são utilizadas na área da hidráulica, é mais comum utilizar a cota piezométrica, H , em vez da pressão, p , e o caudal, Q , em vez da velocidade média do escoamento, V . Sabendo as expressões do caudal $Q = VA$ e da pressão $p = \rho gH$ a equação da continuidade fica,

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.19)$$

Ao transformar a pressão em cota piezométrica considera-se que a massa volúmica é constante, no entanto a compressibilidade do fluido não é desprezada visto que é tida em conta no cálculo da celeridade da onda de pressão.

2.4.2 Equação da Quantidade de Movimento

Tal como para a equação da continuidade foi novamente considerado um volume de controlo na conduta, representado na figura 2.14, mas desta vez para a aplicação da segunda lei de Newton. Mais uma vez o volume de controlo corresponde a um sistema isolado, situado entre duas secções fixas transversais ao eixo da conduta e distantes entre si Δx num instante de tempo t .

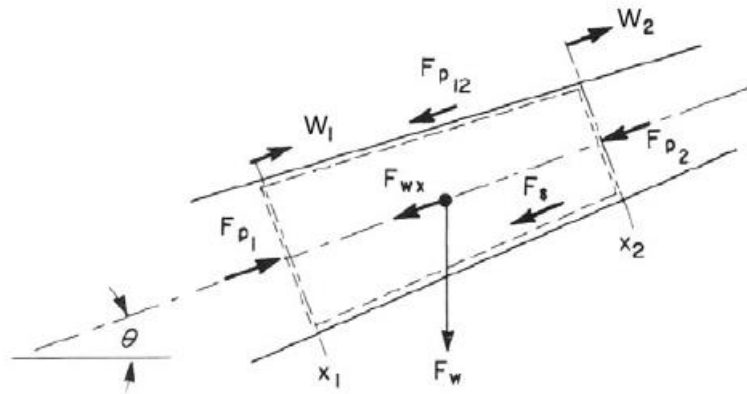


Figura 2.14 - Volume de controlo considerado na equação da quantidade de movimento [2]

A equação da quantidade de movimento pode ser expressa por,

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho AV) + \frac{(\rho AV^2)_2 - (\rho AV^2)_1}{\Delta x} = \frac{\Sigma F}{\Delta x} \quad (2.20)$$

As forças aplicadas no volume de controlo são as de pressão normal na direcção do eixo da conduta exercidas nas secções transversais, F_{p1} e F_{p2} , as componentes de atrito, F_s , e pressão, F_{p12} , aplicadas na superfície lateral, e a componente da força gravítica no eixo da conduta, F_{wx} .

$$\Sigma F = F_{p1} - F_{p2} - F_{p12} - F_{wx} - F_s \quad (2.21)$$

Sabendo que

$$\begin{aligned}
 F_{p1} &= p_1 A_1 \\
 F_{p2} &= p_2 A_2 \\
 F_{p12} &= \frac{1}{2} (p_1 + p_2) (A_1 - A_2) \\
 F_{wx} &= \rho g A (x_2 - x_1) \sin \theta \\
 F_s &= \tau_0 \pi D (x_2 - x_1)
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

O somatório de forças é então

$$\Sigma F = \frac{1}{2} (p_1 - p_2) (A_1 + A_2) - \rho g A (x_2 - x_1) \sin \theta - \tau_0 \pi D (x_2 - x_1) \tag{2.23}$$

Dividindo por $\Delta x = x_2 - x_1$ obtém-se

$$\frac{\Sigma F}{\Delta x} = \frac{(p_1 - p_2) (A_1 + A_2)}{2 \Delta x} - \rho g A \sin \theta - \tau_0 \pi D \tag{2.24}$$

Substituindo a equação 2.24 na equação 2.20 e fazendo Δx tender para zero,

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho A V) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho A V^2) + A \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g A \sin \theta + \tau_0 \pi D = 0 \tag{2.25}$$

Sendo a tensão de corte dada por,

$$\tau_0 = \frac{1}{8} \rho f V |V| \tag{2.26}$$

Sendo f o factor de atrito de Darcy-Weisbach. De forma a garantir que a força de atrito se opõe ao sentido do escoamento, V^2 é expresso por $V|V|$.

A equação 2.25 pode então ser escrita da seguinte forma,

$$V \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho A) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho A V) \right] + \rho A \frac{\partial V}{\partial t} + \rho A V \frac{\partial V}{\partial x} + A \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g A \sin \theta + \frac{\rho A f V |V|}{2D} = 0 \tag{2.27}$$

Considerando a equação 2.8, a soma dos termos entre parêntesis é nula. Dividindo a equação 2.27 por ρA ,

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{f V |V|}{2D} = 0 \tag{2.28}$$

Tal como para a equação da continuidade, o termo convectivo da aceleração pode ser desprezado. Também o termo que representa a inclinação do eixo da conduta devido ao seu pequeno valor pode ser desprezado.

A equação da quantidade de movimento fica então,

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (2.29)$$

Escrevendo em ordem à cota piezométrica e ao caudal volúmico

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (2.30)$$

2.5 Modelo Analítico de uma Chaminé de Equilíbrio

Após ser modelado o comportamento do escoamento nas condutas é necessário modelar o seu comportamento na fronteira em contacto com a chaminé, para tal é necessário proceder à modelação analítica da chaminé de equilíbrio.

Para modelar a dinâmica de uma chaminé de equilíbrio são consideradas nulas as perdas de carga para uma chaminé de equilíbrio de secção constante. Assim é possível aproximar o sistema hidráulico a um problema de oscilação de massa e deduzir as variáveis Z_* e T_* que representam respectivamente a amplitude e o período das oscilações da superfície livre na chaminé de equilíbrio desprezando as perdas de carga. A dedução pode ser consultada em [11].

Considerando uma chaminé de equilíbrio simples e anulando as perdas de carga na conduta, a equação da quantidade de movimento pode ser escrita da seguinte forma,

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{gA}{L} z \quad (2.31)$$

Considerando um fecho instantâneo da válvula, a equação da continuidade é dada por,

$$\frac{dz}{dt} = \frac{1}{A_s} Q \quad (2.32)$$

Derivando em ordem a t e substituindo na equação 2.31,

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{gA}{LA_s} z = 0 \quad (2.33)$$

A equação representa uma equação linear homogénea de 2ª ordem pelo que a sua solução é dada por,

$$z = C_1 \cos \sqrt{\frac{gA}{LA_s}} t + C_2 \sin \sqrt{\frac{gA}{LA_s}} t \quad (2.34)$$

Considerando as condições iniciais $z = 0$ e $t = 0$, deduz-se

$$C_1 = 0$$

$$C_2 = Q \sqrt{\frac{L}{gAA_s}} \quad (2.35)$$

O movimento da superfície livre numa chaminé de equilíbrio de secção constante desprezando as perdas de carga é então descrito por,

$$z = Q \sqrt{\frac{L}{gAA_s}} \sin \sqrt{\frac{gA}{LA_s}} t \quad (2.36)$$

A amplitude e a frequência dessas oscilações são então,

$$Z_* = Q \sqrt{\frac{L}{gAA_s}} \quad (2.37)$$

$$T_* = 2\pi \sqrt{\frac{LA_s}{gA}} \quad (2.38)$$

2.5.1 Estabilidade de Chaminés de Equilíbrio

Num aproveitamento hidráulico a potência gerada pela turbina está constantemente a sofrer oscilações, consoante a frequência dessas oscilações pode suceder um fenómeno de ressonância no qual a frequência de oscilação corresponde à frequência natural da chaminé.

A área transversal da chaminé deverá então ser suficientemente grande para prevenir que não ocorra uma situação de ressonância podendo assim a chaminé ser considerada como estável.

A instabilidade de uma chaminé pode ter duas origens, oscilações de pequenas amplitudes ou oscilações de grandes amplitudes. As primeiras estão relacionadas com pequenas alterações, por exemplo uma pequena instabilidade na potência da turbina. As segundas estão relacionadas com alterações significativas no regime de funcionamento do sistema hidráulico. A dedução das equações que determinam a área mínima da chaminé pode ser consultada em [10].

2.5.1.1 Instabilidade devido a oscilações de pequenas amplitudes

Para o problema de instabilidade devido a oscilações de pequenas amplitudes, foram propostas por Thoma duas condições que definem um valor mínimo da secção da chaminé que garante a sua estabilidade.

$$\frac{H - 3h_f}{H - h_f} > 0 \quad (2.39)$$

$$A_S \geq A_{Th} = \frac{V_0^2}{2g} \cdot \frac{LA_T}{h_f(H - h_f)} \quad (2.40)$$

Sendo H a cota piezométrica no reservatório, h_f a perda de carga na tubagem em regime permanente, V_0 a velocidade em regime permanente, A_T a área da tubagem a montante da chaminé, L o comprimento da tubagem a montante da chaminé e g a aceleração gravítica.

A primeira condição é praticamente sempre cumprida uma vez que a existência de perdas de carga tão elevadas tornariam o sistema hidráulico economicamente inviável.

A segunda condição implica que a área da chaminé tenha um valor igual ou superior à área definida por Thoma, A_{Th} . Por isso a área mínima da chaminé, A_S , é definida por $A_S = nA_{Th}$ representando n um coeficiente de segurança.

2.5.1.2 Instabilidade devido a oscilações de grandes amplitudes

Para situações em que as oscilações se aproximam do limite da estabilidade, o coeficiente de segurança é dado por,

$$n^* = \frac{A_S}{A_{Th}} = \left(1 + 0.482 \frac{Z_*}{H - h_f} \right) \quad (2.41)$$

Para analisar um problema de grandes amplitudes são considerados os chamados parâmetros de Voigt,

$$\beta = \frac{h_f}{H} \quad (2.42)$$

$$\varepsilon = \frac{LA_TV_0^2}{gA_S(h_f)^2} = \frac{Z_*^2}{(h_f)^2} \quad (2.43)$$

Substituindo na equação 2.41,

$$n^* = \frac{A_S}{A_{Th}} = \frac{2}{\varepsilon} \cdot \frac{1 - \beta}{\beta} \quad (2.44)$$

Ou,

$$\frac{\beta^*}{1 - \beta^*} + 0.482\sqrt{\varepsilon} \left(\frac{\beta^*}{1 - \beta^*} \right)^2 - \frac{2}{\varepsilon} = 0 \quad (2.45)$$

Dos vários autores que estudaram este assunto destacam-se Jaeger que comparou a sua curva β^* , com as obtidas por Frank β_{Fr} , e por Thoma β_{Th} tal como representado na figura 2.15. A curva conseguida por Thoma foi obtida considerando o seguinte parâmetro adimensional,

$$\varepsilon_{Th} = \frac{2(1 - \beta_{Th})}{\beta_{Th}} \quad (2.46)$$

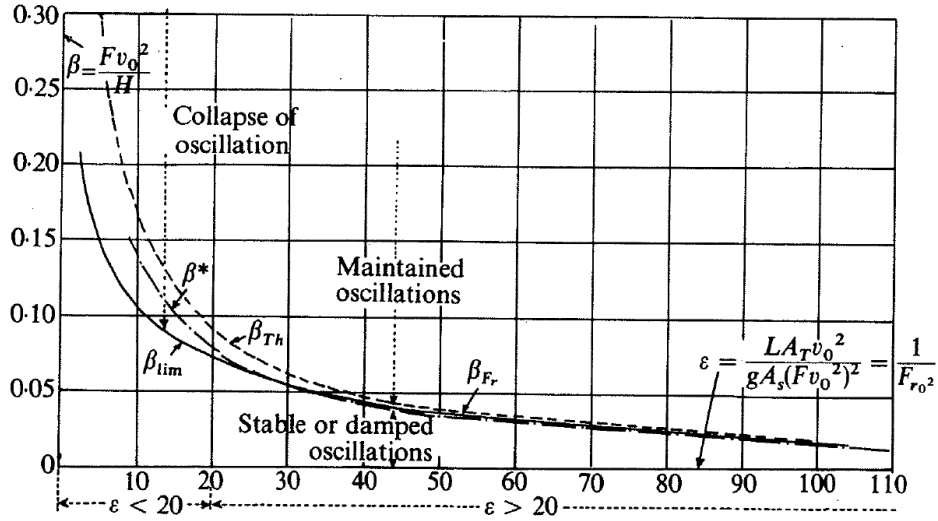


Figura 2.15 - Curvas de β em ordem a ε obtidas através de um método analítico, por Frank e por Thoma [10]

Para situações com $\varepsilon < 20$ a curva considerada deve ser β_{lim} . Para o dimensionamento de chaminés de equilíbrio com $\varepsilon > 20$ qualquer uma das curvas é aplicável.

Este método gráfico serve então como ferramenta para verificar que o dimensionamento da chaminé está correcto. De forma a garantir que a chaminé nunca entra numa situação de ressonância, a sua construção deve ser feita de forma a garantir que $\beta < \beta_{lim}$.

2.5.2 Perda de carga numa chaminé de equilíbrio

Uma das formas de reduzir a amplitude das oscilações numa chaminé de equilíbrio passa pela implementação de uma perda de carga na base da chaminé.

Ao orifício na base da chaminé corresponde uma perda de carga que é dada por,

$$h_{or} = \frac{Q_0^2}{C_d^2 A_o^2 2g} \quad (2.47)$$

Sendo que h_{or} representa a perda de carga provocada pelo orifício, A_o a área do orifício e C_d o coeficiente de vazão do orifício. Dependendo da forma, o valor do coeficiente de vazão varia normalmente entre 0,6 e 0,9.

Foi então proposto por Calame e Gaden que a perda de carga na chaminé, provocada pelo orifício deve respeitar a seguinte condição,

$$\frac{Z_*}{\sqrt{2}} + \frac{1}{4}h_f \leq h_{or} \leq \frac{Z_*}{\sqrt{2}} + \frac{3}{4}h_f \quad (2.48)$$

Sendo h_f a perda de carga na conduta.

Considerando uma situação de fecho instantâneo foi apresentado por Calame e Gaden o gráfico da figura 2.16 que relaciona o valor máximo da amplitude de oscilação, z_m , com as perdas

de carga na conduta, F_{r0} , e no orifício, r_0 . Para tal foram considerados os parâmetros definidos na secção 2.3.1 e foi definido o parâmetro relativo ao orifício ,

$$F_{r0} = \frac{h_f}{Z_*}$$

$$r_0 = \frac{h_{or}}{Z_*} \quad (2.49)$$

$$z_m = \frac{z_{\max}}{Z_*}$$

Através da análise do gráfico é possível quantificar a amortecimento da primeira sobrepressão em ordem à perda de carga na conduta e no orifício.

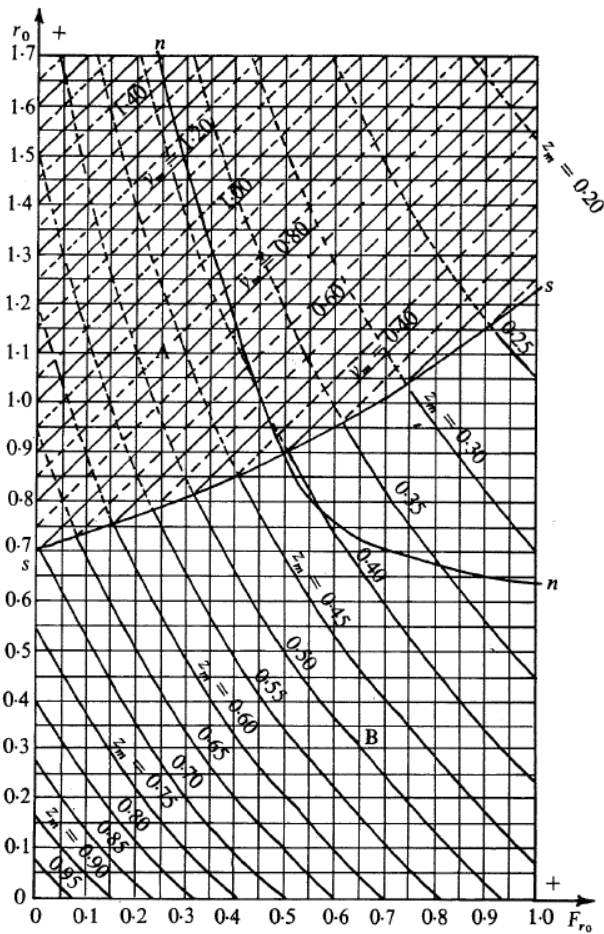


Figura 2.16 - Valor máximo das oscilações numa chaminé para um fecho instantâneo [10]

2.6 Método das Características

2.6.1 Base Teórica do Método

As equações da continuidade e da quantidade de movimento formam um sistema de equações diferenciais parciais do tipo hiperbólico, cuja solução analítica exacta não pode ser obtida. É por isso necessário obter uma aproximação através de uma integração numérica. O método mais utilizado é o método das características devido à sua simplicidade de programação e precisão. O processo completo de integração das equações pode ser consultado em [2] e [12].

Através do método das características as duas equações diferenciais parciais, sendo as variáveis dependentes a cota piezométrica e o caudal e as variáveis independentes a distância ao longo da tubagem e o passo de tempo, são transformadas em equações diferenciais ordinárias e identificadas segundo as linhas características C^+ e C^- representadas na figura 2.17.

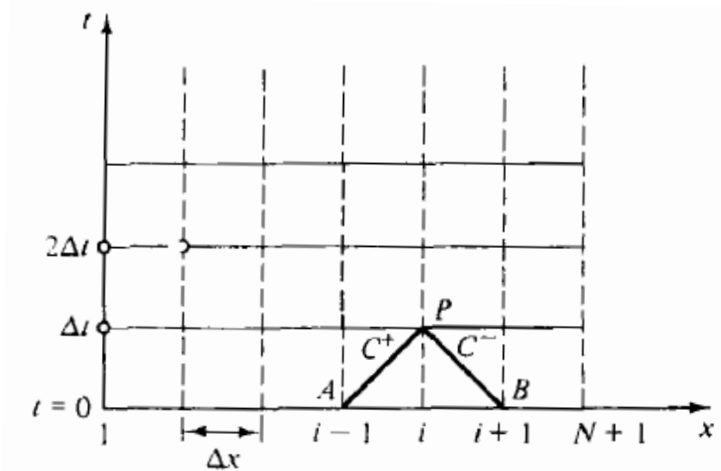


Figura 2.17 - Malha do método das características [12]

$$\left. \begin{aligned} \frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| &= 0 \\ \frac{dx}{dt} &= a \end{aligned} \right\} C^+ \quad (2.50)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| &= 0 \\ \frac{dx}{dt} &= -a \end{aligned} \right\} C^- \quad (2.51)$$

Para integrar estas equações é utilizado o método das diferenças finitas, no qual a conduta de comprimento L , é dividida em N elementos iguais, de comprimento $\Delta x = L/N$. O passo de tempo utilizado é $\Delta t = \Delta x/a$.

Da integração e discretização das equações diferenciais nas duas linhas características resultam duas equações que permitem descrever a evolução da cota piezométrica e do caudal,

$$H_P - H_A + \frac{a}{gA}(Q_P - Q_A) + \frac{f\Delta x}{2gDA^2} Q_A |Q_A| = 0 \quad (2.52)$$

$$H_P - H_B - \frac{a}{gA}(Q_P - Q_B) - \frac{f\Delta x}{2gDA^2} Q_B |Q_B| = 0 \quad (2.53)$$

Resolvendo em ordem à cota piezométrica no ponto intermédio H_P ,

$$C^+ : H_P = H_A - B(Q_P - Q_A) - RQ_A |Q_A| \quad (2.54)$$

$$C^- : H_P = H_B + B(Q_P - Q_B) + RQ_B |Q_B| \quad (2.55)$$

Onde,

$$B = \frac{a}{gA} \quad (2.56)$$

$$R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2} \quad (2.57)$$

Sendo B a impedância característica da tubagem e R o coeficiente de resistência da tubagem.

Os valores de cota piezométrica e de caudal em todos os pontos da conduta são conhecidos em regime permanente, ou seja no instante $t = 0$. O método consiste no cálculo de H e Q no nó interior i no instante de tempo $t = \Delta t$ sendo já conhecidos os valores nos nós $i - 1$ e $i + 1$ no instante $t = 0$ e assim sucessivamente até ao instante de tempo pretendido.

As equações, designadas de equações da compatibilidade, podem então ser escritas como,

$$C^+ : H_{P_i} = C_P - BQ_{P_i} \quad (2.58)$$

$$C^- : H_{P_i} = C_M + BQ_{P_i} \quad (2.59)$$

As constantes C_P e C_M são conhecidas e são expressas por,

$$C_P = H_{i-1} + BQ_{i-1} - RQ_{i-1}|Q_{i-1}| \quad (2.60)$$

$$C_M = H_{i+1} - BQ_{i+1} + RQ_{i+1}|Q_{i+1}| \quad (2.61)$$

Então, resolvendo as equações em ordem a H_{P_i} e Q_{P_i} ,

$$H_{P_i} = \frac{C_P + C_M}{2} \quad (2.62)$$

$$Q_{P_i} = \frac{C_P - C_M}{2B} \quad (2.63)$$

No entanto, nas fronteiras da grelha apenas uma das equações características pode ser utilizada, é então necessário definir outra equação que relacione a cota piezométrica e o caudal. Nos nós das extremidades são então consideradas as condições fronteira que compatibilizam o escoamento no exterior da conduta com o escoamento no interior.

2.6.2 Condições Fronteira

2.6.2.1 Reservatórios

Considerando um reservatório de grandes dimensões transversais,

$$H_{P_i} = H_R \quad (2.64)$$

Sendo H_R a cota piezométrica na junção do reservatório com a tubagem e considerada constante. Caso a cota piezométrica não seja constante é necessário introduzir, para cada passo de tempo, o seu valor nas equações.

Para obter a condição que descreve o caudal considerando um reservatório na extremidade a montante é utilizada a equação negativa da compatibilidade C^- ,

$$Q_{P_i} = \frac{H_R - C_M}{B} \quad (2.65)$$

Analogamente para um reservatório na extremidade a jusante é utilizada a equação positiva da compatibilidade C^+ ,

$$Q_{P_i} = \frac{C_P - H_R}{B} \quad (2.66)$$

2.6.2.2 Válvulas

Considerando um escoamento em regime permanente o caudal é dado pela seguinte expressão,

$$Q_0 = (C_{d_0} A_0) \sqrt{2gH_0} \quad (2.67)$$

Na qual C_{d_0} , corresponde ao coeficiente de vazão e o índice 0 refere-se ao valor das variáveis em regime permanente.

Para o funcionamento genérico da válvula,

$$Q_{P_i} = (C_d A) \sqrt{2g H_{P_i}} \quad (2.68)$$

Igualando as duas equações,

$$\frac{Q_{P_i}}{Q_0} = \frac{(C_d A)}{(C_{d_0} A_0)} \sqrt{\frac{H_{P_i}}{H_0}} \quad (2.69)$$

Resolvendo em ordem à cota piezométrica,

$$H_{P_i} = \frac{H_0}{(Q_0 \tau)^2} Q_{P_i}^2 \quad (2.70)$$

Sendo τ o parâmetro de abertura ou de fecho relativo da válvula,

$$\tau = \frac{(C_d A)}{(C_{d_0} A_0)} \quad (2.71)$$

Utilizando as equações da compatibilidade, para um escoamento positivo na válvula a solução é,

$$Q_{P_i} = -2BC_v + \sqrt{(2BC_v)^2 + 2C_v(C_P - C_M)} \quad (2.72)$$

Em que,

$$C_v = \frac{(Q_0 \tau)^2}{H_0} \quad (2.73)$$

Analogamente para um escoamento no sentido negativo,

$$Q_{P_i} = 2BC_v - \sqrt{(2BC_v)^2 - 2C_v(C_P - C_M)} \quad (2.74)$$

Para a situação especial em que a válvula funciona como válvula de segurança,

$$Q_{P_i} = -BC_v + \sqrt{(BC_v)^2 + 2C_v C_P} \quad (2.75)$$

2.6.2.3 Chaminé de Equilíbrio

Fazendo um balanço de caudais junto à chaminé de equilíbrio,

$$Q_{P_{i,n+1}} = Q_{P_{i+1,1}} + Q_{P_s} \quad (2.76)$$

A cota piezométrica será igual entre os elementos,

$$H_{P_{i,n+1}} = H_{P_{i+1,1}} = z_p \quad (2.77)$$

Considerando z_p como o nível de água na chaminé após o passo de tempo Δt ,

$$z_p = z + \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{A_s} (Q_{P_s} + Q_s) \quad (2.78)$$

Sendo Q_{P_s} e Q_s os caudais da chaminé no início e no fim do passo de tempo respectivamente. A_s representa a área transversal da chaminé. A notação considerada está representada na figura 2.18.

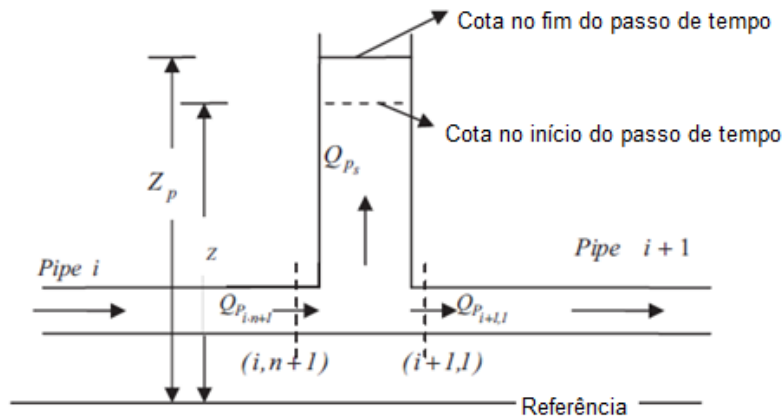


Figura 2.18 - Representação da chaminé (adaptado de [13])

Combinando as equações acima com as equações da compatibilidade, a solução em ordem à cota piezométrica será,

$$H_{P_{i,n+1}} = \frac{C_P - C_M + Q_s + \left(2 A_s z / \Delta t\right)}{2B + \left(2 A_s / \Delta t\right)} \quad (2.79)$$

A ligação entre a chaminé e a conduta está representada na figura 2.19,

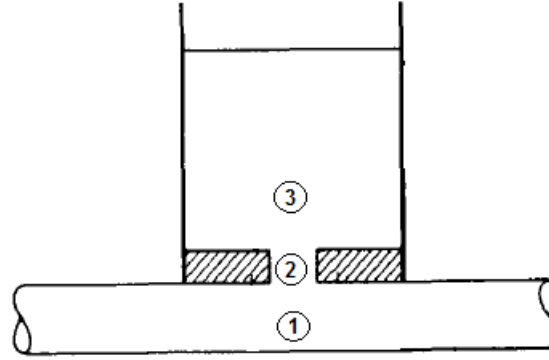


Figura 2.19 - Representação da perda de carga (adaptado de [12])

Para o caso em que existem perdas de carga na entrada da chaminé, estas são modeladas da seguinte forma,

$$H_{P_1} - H_{P_3} = C_1 - C_2 Q_{P_2} \quad (2.80)$$

Os valores das constantes C_1 e C_2 estão relacionados com o tipo de perda de carga considerado.

No caso de existir uma conduta de ligação com um orifício,

$$C_1 = H_3 - H_1 + 2\rho g \Delta z - \frac{2L_2}{A_2 \Delta t} Q_2 \quad (2.81)$$

$$C_2 = \frac{fL_2}{D_2 \rho A_2^2} |Q_2| + \frac{1}{\rho C_D^2 A_0^2} |Q_2| + \frac{2L_2}{A_2 \Delta t}$$

No caso de ser considerada uma conduta de ligação sem orifício,

$$C_1 = H_3 - H_1 + 2\rho g \Delta z - \frac{2L_2}{A_2 \Delta t} Q_2 \quad (2.82)$$

$$C_2 = \frac{fL_2}{D_2 \rho A_2^2} |Q_2| + \frac{2L_2}{A_2 \Delta t}$$

No caso de ser considerado um orifício mas não ser considerada a conduta de ligação,

$$C_1 = H_3 - H_1 \quad (2.83)$$

$$C_2 = \frac{1}{\rho C_D^2 A_0^2} |Q_2|$$

No caso em que não existem perdas de carga, as constantes C_1 e C_2 são nulas e a condição fronteira considerada para a chaminé de equilíbrio é expressa na equação 2.77.

3 Código Numérico

O código numérico utilizado neste trabalho é baseado no método das características e permite simular e resolver problemas quer em regime permanente quer em regime transitório. O sistema é discretizado em nós permitindo assim ao utilizador obter a velocidade e a pressão num dado instante e em qualquer local do sistema hidráulico que se esteja a estudar.

O código começa por calcular a solução em regime permanente, através da equação de Bernoulli, para assim definir as condições iniciais do sistema. Para uma situação de regime transitório essas condições iniciais são utilizadas no método das características descrito anteriormente.

Antes de ser efectuada qualquer simulação em regime transitório é então necessário definir:

- Propriedades do fluído:
 - Fluído considerado;
 - Temperatura do fluído;
- Especificações dos reservatórios:
 - Cota piezométrica da superfície livre do reservatório;
 - Pressão na superfície livre;
- Especificações das condutas:
 - Comprimento de cada conduta;
 - Diâmetro interno;
 - Velocidade de propagação da onda de pressão na conduta;
 - Factor de atrito;
- Especificações das válvulas:
 - Cota a que se encontra a válvula;
 - Perda de carga na válvula;
 - Lei de fecho da válvula;
- Discretização do sistema:
 - Número de nós na conduta de menor comprimento;
 - Tempo de simulação;

3.1 Validação de Procedimentos

De seguida é apresentada uma validação de procedimentos de forma a garantir que o código numérico está a ser utilizado de forma correcta. Para tal foi simulada uma instalação com condutas simples, com condutas com atrito, com uma chaminé de equilíbrio desprezando o atrito nas condutas e com uma chaminé de equilíbrio tendo em conta o atrito nas condutas. Os resultados obtidos nas três primeiras simulações são comparados com os resultados conhecidos através das teorias clássicas descritas anteriormente, os resultados para uma chaminé tendo em conta o atrito nas condutas são comparados com os obtidos por Macedo [14]. Em todas as simulações o escoamento é garantido pela diferença de cotas entre dois reservatórios sendo o fenómeno transiente provocado pelo fecho de uma válvula. O fluido considerado nas simulações é água.

3.1.1 Conduta Simples



Figura 3.1 - Conduta simples (Esquema)

Na figura 3.1 está representado um esquema de um sistema com condutas simples na qual não são consideradas as perdas de carga relacionadas com o atrito.

Nas tabelas 3.1, 3.2 e 3.3 caracteriza-se a instalação:

Tabela 3.1 - Reservatórios (conduta simples)

Cota da superfície do reservatório 1 (m)	250
Cota da saída do reservatório 1 (m)	0
Pressão no reservatório 1	Atmosférica
Cota da superfície reservatório 2 (m)	220
Cota da entrada do reservatório 2 (m)	0
Pressão no reservatório 2	Atmosférica

Tabela 3.2 - Condutas (conduta simples)

Diâmetro das condutas (m)	0,2
Comprimento da conduta 1 (m)	500
Comprimento da conduta 2 (m)	20

Tabela 3.3 - Válvula (conduta simples)

Coeficiente de vazão da válvula	114
Cota da válvula (m)	0

Tabela 3.4 - Fluido (conduta simples)

Celeridade da onda de pressão (m/s)	1200
Temperatura (°C)	20

Inicialmente é estudado o problema em regime permanente que vai servir de condição inicial para o regime transitório. Na figura 3.2 representa-se a evolução da cota piezométrica ao longo da conduta em regime permanente.

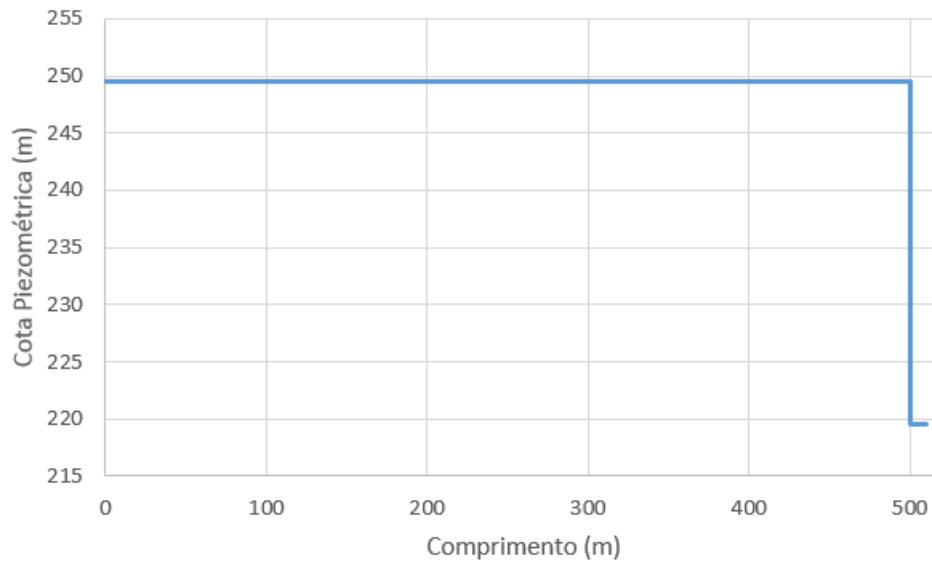


Figura 3.2 - Evolução da cota piezométrica ao longo da instalação em regime permanente

A válvula é responsável pela principal perda de carga na instalação, no entanto a diferença entre o valor da superfície livre dos reservatórios e a sua cota piezométrica correspondente deve-se à existência de duas perdas de carga, de baixa valor, localizadas na ligação entre os dois reservatórios e as condutas

Quando ocorre um regime transitório devido ao fecho da válvula, considerando uma manobra instantânea, surge uma onda de pressão cujo comportamento está de acordo com a teoria de Joukowski.

De acordo com Joukowski, a amplitude da onda é dada por

$$\Delta p = \rho V_0 a = 998 \times 1.5 \times 1200 = \pm 1.8 \text{ MPa}$$

Ou convertendo em unidades de cota piezométrica,

$$\Delta H = \frac{\Delta p}{\rho g} = \frac{1.8 \times 10^6}{998 \times 9.81} \cong 183.9 \text{ m}$$

Logo os valores máximos e mínimos de cota piezométrica serão,

$$H_{\max} = 250 + 183.9 = 433.9 \text{ m}$$

$$H_{\min} = 250 - 183.9 = 66.1 \text{ m}$$

Segundo Joukowski o período da onda é dado por,

$$T = \frac{4L}{a} = \frac{4 \times 500}{1200} \cong 1.67 \text{ s}$$

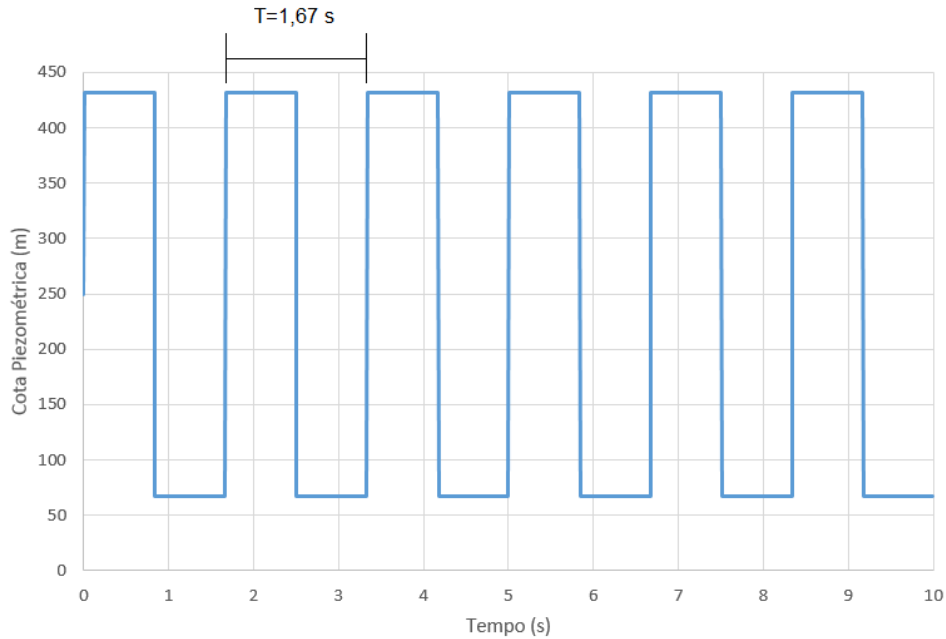


Figura 3.3 - Evolução da cota piezométrica a montante da válvula

Na figura 3.3 representa-se a evolução da cota piezométrica imediatamente a montante da válvula. O período da onda é coerente com o resultado obtido segundo Joukowski. Os resultados da simulação foram uma sobrepressão de $H_{\max} = 432.20 \text{ m}$ e uma depressão de $H_{\min} = 66.97 \text{ m}$. Estes resultados são bastante semelhantes aos obtidos analiticamente pela teoria de Joukowski, sendo que para a sobrepressão o erro relativo é de 0,39 % e para a depressão 1,31%. A diferença entre os resultados está, como referido anteriormente, relacionada com as perdas de carga na ligação entre o reservatório e a conduta.

À medida que a medição de pressão é feita numa secção mais próxima do reservatório, a sobrepressão e a depressão têm uma duração menor do que na secção imediatamente a montante da válvula. A figura 3.4 representa a evolução da cota piezométrica caso a sonda de pressão fosse colocada a meio da conduta.

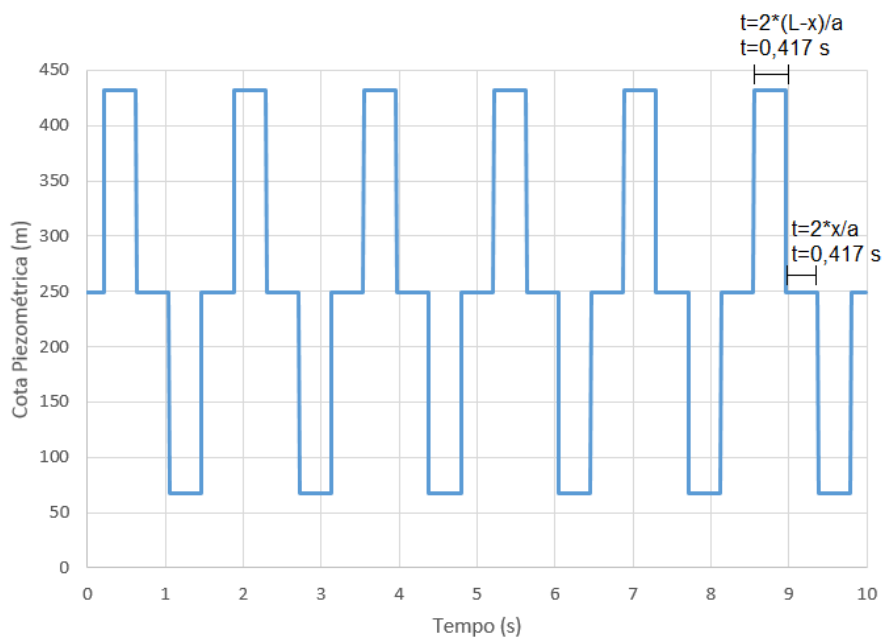


Figura 3.4 - Evolução da cota piezométrica a meio da conduta

A duração da sobrepressão e da depressão da onda corresponde então a,

$$t = \frac{2 \times (L - x)}{a} = \frac{2 \times (500 - 250)}{1200} \cong 0,417 \text{ s}$$

Quando a sonda de pressão é colocada junto ao reservatório verifica-se que a conduta nessa zona está sujeita a picos de pressão com um intervalo de,

$$t = \frac{2L}{a} = 0,83 \text{ s}$$

Na figura 3.5 apresenta-se a evolução da cota piezométrica considerando a secção junto ao reservatório.

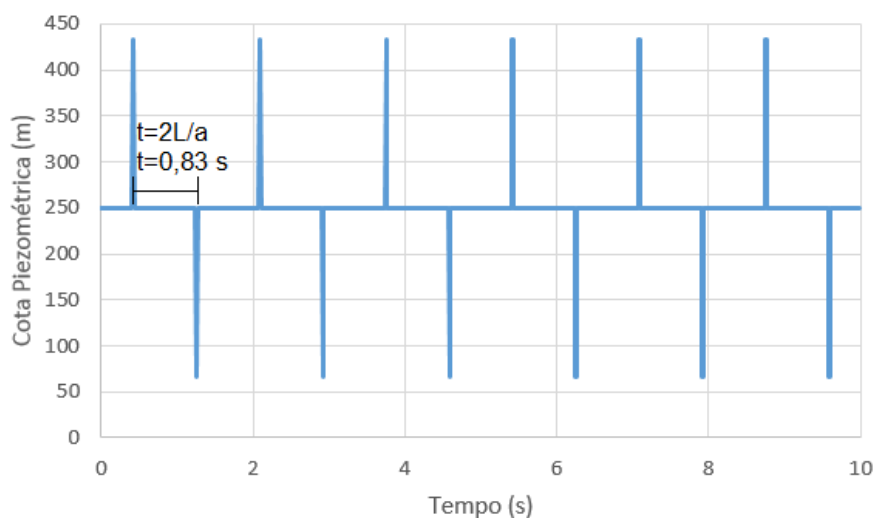


Figura 3.5 - Evolução da cota piezométrica junto ao reservatório

3.1.2 Conduta com atrito

Para esta simulação foi considerada uma instalação semelhante à anterior com a diferença que já foram consideradas as perdas distribuídas nas condutas devido ao atrito. Foi considerado um coeficiente de atrito $f = 0.02$.

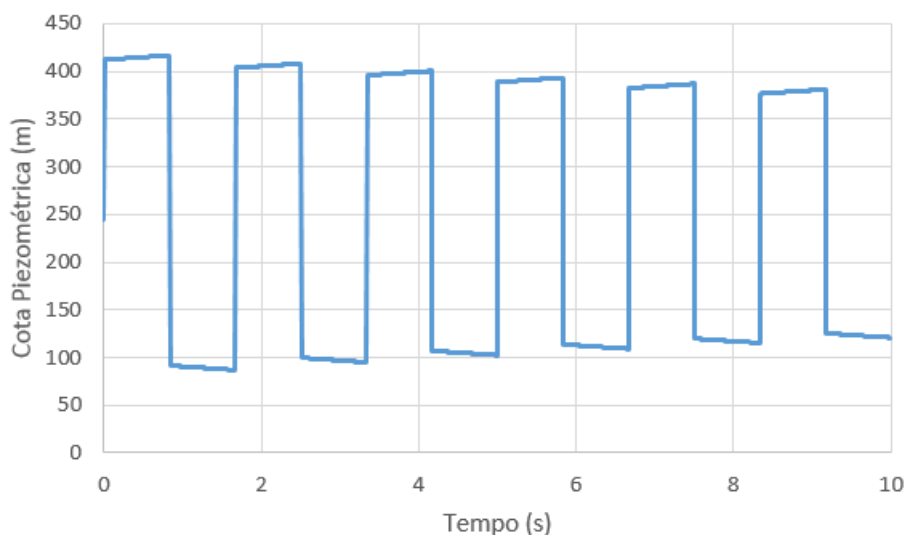


Figura 3.6 - Evolução da cota piezométrica considerando as perdas distribuídas

Ao considerar as perdas distribuídas é possível observar na figura 3.6 que a nível global a envolvente da cota piezométrica diminui, no entanto, em cada sobrepressão e depressão é visível um aumento. Esse aumento está relacionado com os efeitos viscosos que travam o fluido implicando o surgimento de mais um efeito de inércia.

3.1.3 Chaminé de Equilíbrio sem perdas de carga

Nas secções anteriores foi estudado o regime transitório em condutas com e sem atrito pelo que seguida será estudada a resposta de uma chaminé de equilíbrio desprezando o atrito nas condutas. O regime transitório provocado pelo fecho da válvula irá provocar uma oscilação de massa na chaminé. A instalação considerada é semelhante à considerada na secção 3.1.1 mas com a inclusão de uma chaminé de equilíbrio. O esquema da instalação está representado na figura 3.7.

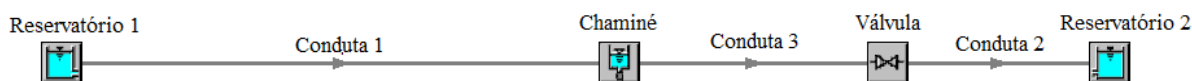


Figura 3.7 - Chaminé de equilíbrio sem perdas (Esquema)

As especificações da instalação são as mesmas que em 3.1.1 tendo os novos elementos da instalação as especificações expressas nas tabelas 3.5 e 3.6.

Tabela 3.5 - Conduta (chaminé de equilíbrio sem perdas)

Diâmetro da Conduta 3 (m)	0,2
Comprimento da Conduta 3 (m)	10

Tabela 3.6 - Chaminé (chaminé de equilíbrio sem perdas)

Área da secção da Chaminé (m ²)	0,5
Cota da base da Chaminé (m)	0

Na figura 3.8 representa-se a oscilação da cota da superfície livre da chaminé de equilíbrio.

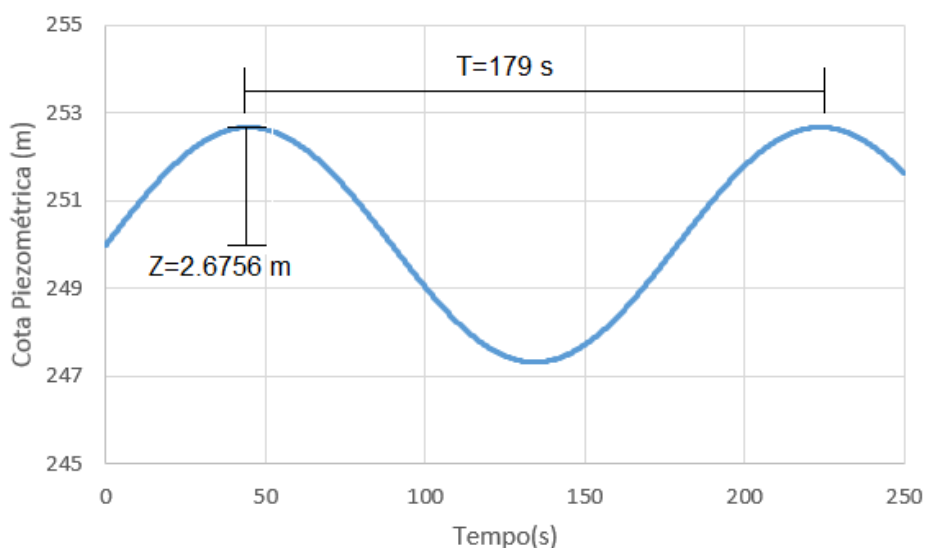


Figura 3.8 - Oscilação da altura da superfície livre da chaminé

A amplitude e o período do movimento oscilatório do nível da superfície livre na chaminé considerando um fenómeno de oscilação de massa são dados pelas equações 2.37 e 2.38,

$$Z_* = Q \sqrt{\frac{L}{gAA_s}} = 2.675 \text{ m}$$

$$T_* = 2\pi \sqrt{\frac{LA_s}{gA}} = 178.9 \text{ s}$$

A sinusóide da variação da altura de água na chaminé obtida na simulação numérica tem uma amplitude e um período que coincidem com os resultados obtidos analiticamente, o que permite concluir que o procedimento utilizado para simular este tipo de chaminés está correcto.

3.1.4 Chaminé de Equilíbrio considerando condutas com atrito

Para se proceder à validação de casos mais complexos nos quais são consideradas as perdas distribuídas nas condutas, foram comparados os resultados obtidos por Macedo na análise à barragem do Caldeirão [14] com os resultados obtidos no código numérico. A instalação considerada está representada na figura 3.9.

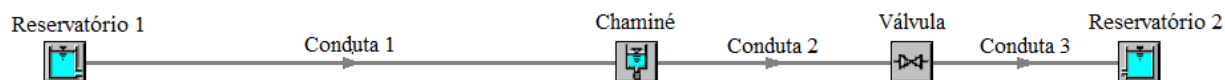


Figura 3.9 – Representação esquemática da instalação da barragem do Caldeirão

Nas tabelas 3.7, a 3.11 caracteriza-se a instalação:

Tabela 3.7 - Reservatórios (chaminé com condutas com atrito)

Cota da superfície do reservatório 1 (m)	702
Cota da saída do reservatório 1 (m)	672
Pressão no reservatório 1	Atmosférica
Cota da superfície reservatório 2 (m)	509
Cota da entrada do reservatório 2 (m)	499
Pressão no reservatório 2	Atmosférica

Tabela 3.8 - Condutas (chaminé com condutas com atrito)

Diâmetro da conduta 1 (m)	3,10
Comprimento da conduta 1 (m)	997
Diâmetro inicial da conduta 2 (m)	2,60
Diâmetro final da conduta 2 (m)	1,67
Comprimento da conduta 2 (m)	375
Diâmetro da conduta 3 (m)	1,67
Comprimento da conduta 3 (m)	5
Rugosidade das condutas (mm)	0,5

Tabela 3.9 - Chaminé (chaminé com condutas com atrito)

Diâmetro da Chaminé (m)	4,2
Cota da base da Chaminé (m)	672

Tabela 3.10 - Fluido (chaminé com condutas com atrito)

Celeridade da onda de pressão (m/s)	1037,6
Temperatura (°C)	20

Considerando que a central turbina um caudal de 23 m³/s foi imposta uma perda de carga na válvula para obter esse valor. As especificações da válvula são as seguintes:

Tabela 3.11 - Válvula (chaminé com condutas com atrito)

Coeficiente de vazão da Válvula	23350
Cota da Válvula (m)	499

Na válvula foi imposta a seguinte lei de fecho,

$$\tau = \left(1 - \frac{t}{t_f}\right)^{1.35} \quad (3.1)$$

Foram então feitas simulações variando o tempo de fecho da válvula entre 10 segundos, 20 segundos e 30 segundos, estando os resultados representados na figura 3.10. Na figura 3.11 estão representados os resultados obtidos por Macedo.

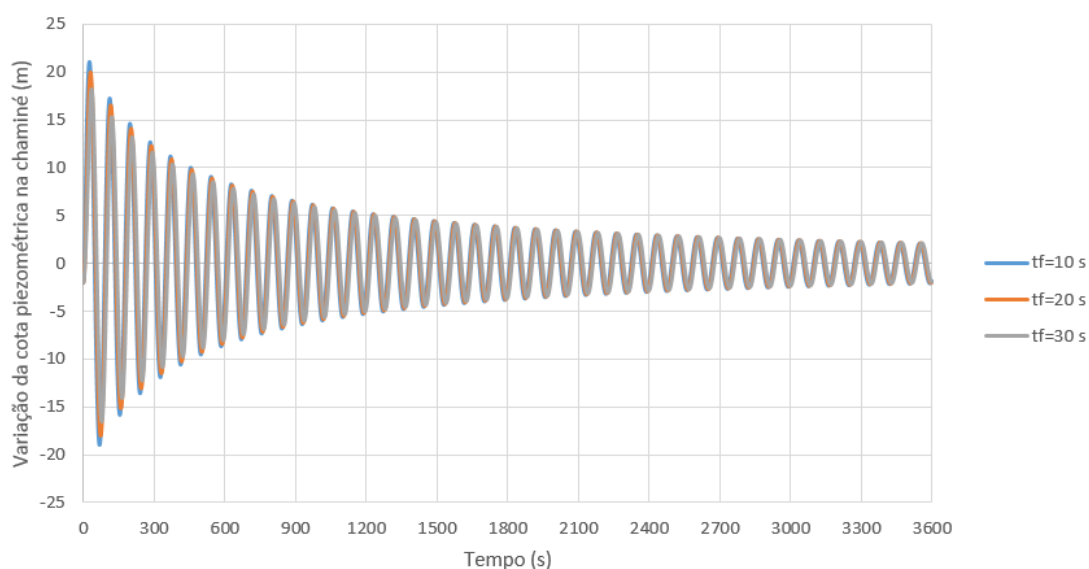


Figura 3.10 - Oscilação da cota piezométrica na chaminé variando o tempo de fecho da válvula obtido no código numérico

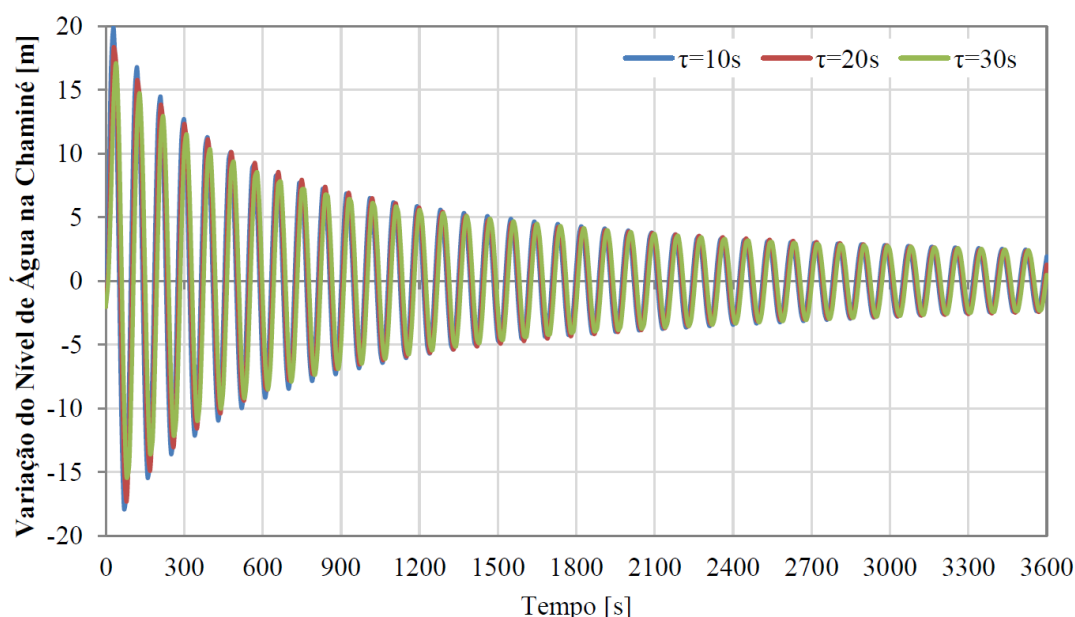


Figura 3.11 - Oscilação da cota piezométrica na chaminé variando o tempo fecho da válvula obtido por Macedo [14]

Tabela 3.12 - Comparação dos valores máximos e mínimos da variação da cota piezométrica

	$t_f = 10 \text{ s}$	$t_f = 20 \text{ s}$	$t_f = 30 \text{ s}$
Código Numérico	21,00 m	19,92 m	18,15 m
	-18,91 m	-18,04 m	-16,57 m
Macedo	19,89 m	18,29 m	17,07 m
	-17,85 m	-17,29 m	-15,39 m

Através da análise das figuras 3.10 e 3.11 e da tabela 3.12 é possível observar que, tal como seria de esperar, com o aumento do tempo de manobra da válvula diminui a intensidade do regime transitório pelo que se verifica uma diminuição no pico inicial da variação da cota piezométrica na chaminé.

Em relação aos dados obtidos por Macedo, as diferenças nos valores máximos e mínimos são justificadas pelo facto de ser desconhecida a lei de fecho utilizada na sua análise, no entanto a comparação das sinusóides obtidas no código numérico com as obtidas por Macedo, demonstra concordância nas frequências em regime de resposta livre uma vez que a frequência natural do sistema apenas depende das características da instalação e não da manobra da válvula. Também os decréscimos entre picos, que representam as perdas relacionadas com as cargas distribuídas, estão de acordo com os apresentados por Macedo.

Ao analisar o gráfico da figura 3.12 que opõe a variação da cota piezométrica ao caudal volumico é possível confirmar que aos valores máximos e mínimos correspondem instantes em que o caudal volumico na chaminé é nulo. Este era o resultado esperado, uma vez que ao final do movimento ascendente ou descendente do nível da água da chaminé tem de corresponder o valor máximo da sobrepressão ou da depressão respectivamente.

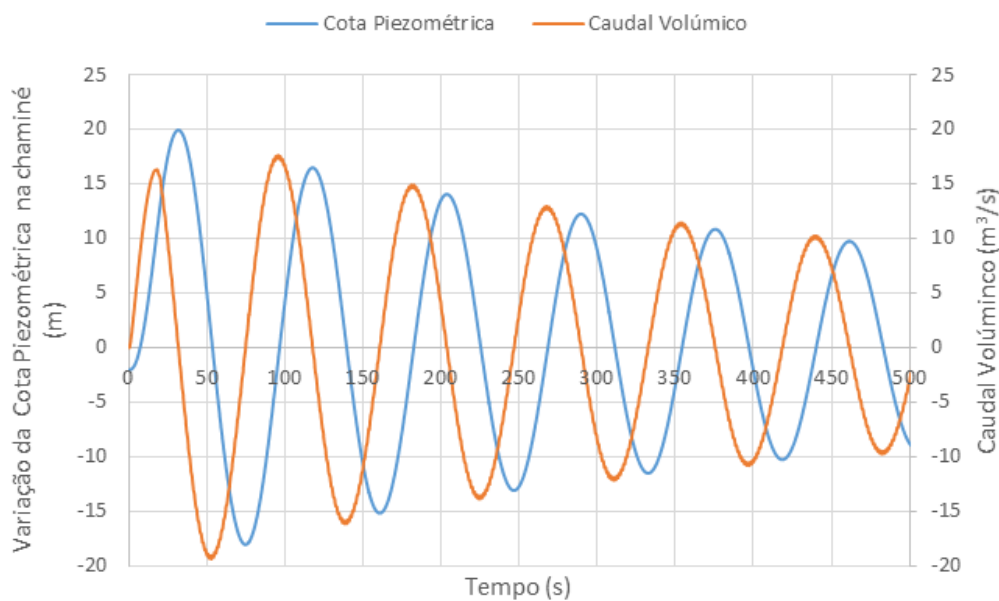


Figura 3.12 - Evolução da variação da cota piezométrica e do caudal volumétrico na chaminé

Uma vez que os resultados obtidos no código numérico estão de acordo com o esperado é possível concluir que os procedimentos para simular este tipo de instalação estão correctos, pelo que no capítulo seguinte serão simuladas instalações mais complexas.

4 Resultados

Neste capítulo é estudado o comportamento dinâmico de uma chaminé de equilíbrio, considerando características geométricas que podem alterar a sua resposta em regime transitório. Estuda-se a influência da variação de secção da chaminé, inicialmente considera-se apenas a variação da sua área, posteriormente introduzem-se câmaras de expansão e de alimentação. Finalmente considera-se uma perda de carga concluindo sobre o seu valor óptimo.

4.1 Instalação Simulada

Para determinar a resposta de uma chaminé de equilíbrio idealizou-se uma instalação com geometria criteriosamente escolhida. Tal como no capítulo anterior o escoamento é garantido pela diferença de cotas entre dois reservatórios e o fenómeno transiente é obtido através do fecho de uma válvula. A chaminé foi colocada a montante da válvula de forma a proteger a conduta de maior dimensão.

As características da instalação representada na figura 4.1 estão indicadas nas tabelas 4.1 a 4.5:

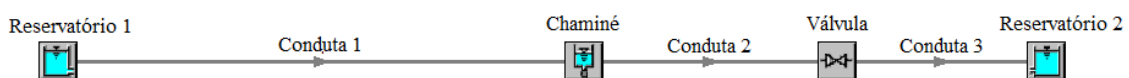


Figura 4.1 - Esquema da instalação simulada

Tabela 4.1 - Reservatórios (instalação simulada)

Cota da superfície do reservatório 1 (m)	100
Cota da saída do reservatório 1 (m)	0
Pressão no reservatório 1	Atmosférica
Cota da superfície reservatório 2 (m)	20
Cota da entrada do reservatório 2 (m)	0
Pressão no reservatório 2	Atmosférica

Tabela 4.2 - Condutas (montagem simulada)

Comprimento da conduta 1 (m)	1000
Comprimento da conduta 2 (m)	5
Comprimento da conduta 3 (m)	5
Diâmetro das condutas (m)	2,5
Rugosidade das condutas (mm)	0,5

Tabela 4.3 - Chaminé (montagem simulada)

Área da chaminé (m ²)	10
Cota da base da chaminé (m)	0

Tabela 4.4 - Fluido (montagem simulada)

Celeridade da onda de pressão (m/s)	1000
Temperatura (°C)	20

De forma a obter o caudal volúmico de 15 m³/s foi considerada uma válvula com as seguintes características:

Tabela 4.5 - Válvula (montagem simulada)

Coefficiente de descarga da válvula	22680
Cota da válvula (m)	0

Por forma a tornar as simulações numéricas mais realistas convém verificar se a chaminé de equilíbrio considerada cumpre com os critérios de estabilidade indicados em 2.5.1. Note-se que não é simulado o funcionamento de uma turbina susceptível de introduzir perturbações no escoamento passíveis de provocarem instabilidade via um fenómeno de ressonância. Não obstante vai se verificar se a chaminé escolhida tem um desempenho satisfatório neste âmbito.

Para perturbações de pequenas amplitudes,

$$A_s > A_{Th} = \frac{V_0^2}{2g} \cdot \frac{LA}{h_f(H - h_f)} = 9,09 \text{ m}^2$$

A área escolhida para a chaminé garante então a estabilidade para oscilações de pequenas amplitudes. Para perturbações de grandes amplitudes, é necessário proceder ao cálculo dos parâmetros de Voigt.

$$\beta = \frac{h_f}{H} = 0,0264$$

$$\varepsilon = \frac{LAV_0^2}{gA_s(h_f)^2} = 67,05$$

De acordo com a figura 2.15, β não ultrapassa o valor de β_{lim} pelo que o dimensionamento da chaminé garante a sua estabilidade perante oscilações de grande amplitude.

Garantido o funcionamento estável da chaminé em condições nominais, estuda-se agora o regime transitório introduzido pelo fecho da válvula. Tal como em 3.1.4 e adopta-se um tempo de fecho de 20 segundos e uma lei,

$$\tau = \left(1 - \frac{t}{t_f}\right)^{1.35}$$

A respectiva resposta na secção imediatamente a montante da chaminé (onde o fenómeno transiente é mais intenso) está representada na figura 4.2,

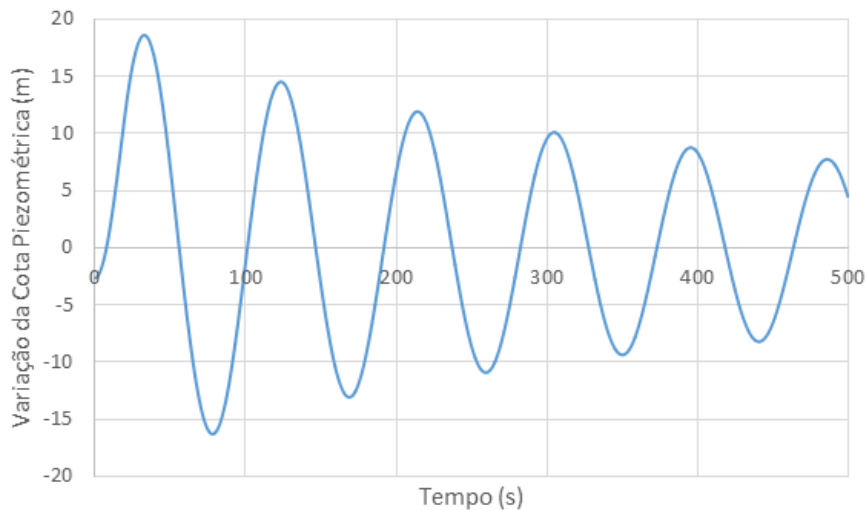


Figura 4.2 - Variação da cota piezométrica considerando uma chaminé simples

4.2 Influência da variação da área da chaminé

De forma a estudar a influência da variação da área transversal da chaminé, foram efectuadas diversas simulações numéricas apenas variando esse parâmetro. Na figura 4.3 estão representados os valores máximos e mínimos da variação da cota piezométrica na secção imediatamente a montante da chaminé em função do diâmetro da mesma.

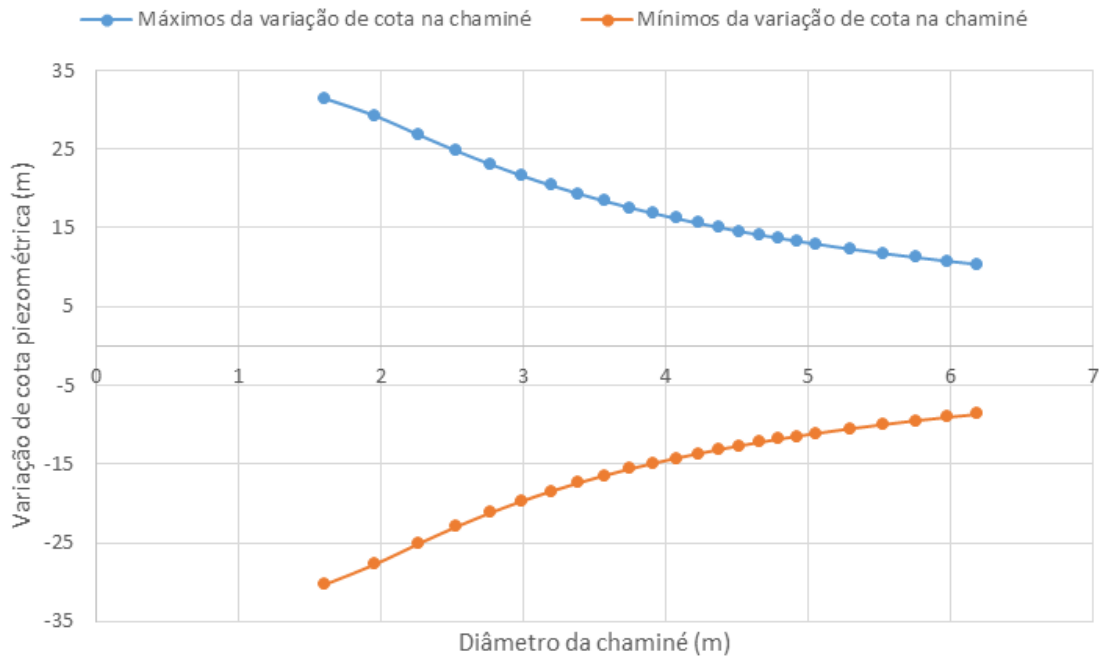


Figura 4.3 - Valores máximos e mínimos da variação da cota piezométrica em função do diâmetro da chaminé

Da análise dos resultados observa-se que o aumento do diâmetro da chaminé provoca a redução da variação de pressão na conduta. Este efeito justifica-se pois um aumento da secção da chaminé conduz ao aumento da inércia da mesma reforçando as suas capacidades de amortecimento do fenómeno transiente.

Observa-se que a redução progressiva do declive das curvas mostra que o resultado do aumento da área da chaminé vai sendo progressivamente reduzido, efeito facilmente identificável para diâmetros maiores que três a quatro metros. Inversamente o custo de construção de uma chaminé aumenta com o seu diâmetro. A escolha da secção da chaminé tem então de ser feita utilizando um critério económico.

4.3 Influência da existência de câmaras na chaminé

A introdução de câmaras de alimentação e de expansão (figura 2.8) numa chaminé pode aumentar a sua eficácia.

Com o objectivo de estudar o comportamento da instalação equipada com uma chaminé com secção transversal variável foram efectuadas três simulações numéricas. Na primeira foi considerada uma chaminé de equilíbrio apenas com uma câmara de expansão, na segunda utiliza-se uma chaminé com uma câmara de alimentação por fim usa-se uma chaminé com câmara de expansão e de alimentação.

Na tabela 4.6 estão caracterizadas as chaminés consideradas.

Tabela 4.6 - Chaminé (chaminé com câmaras)

Cota da base da chaminé (m)	0
Área da chaminé (m ²)	10
Cota da câmara de alimentação (m)	85
Área da câmara de alimentação (m ²)	20
Altura da câmara de alimentação (m)	10
Cota da câmara de expansão (m)	105
Área da câmara de expansão (m ²)	20
Altura da câmara de expansão (m)	10

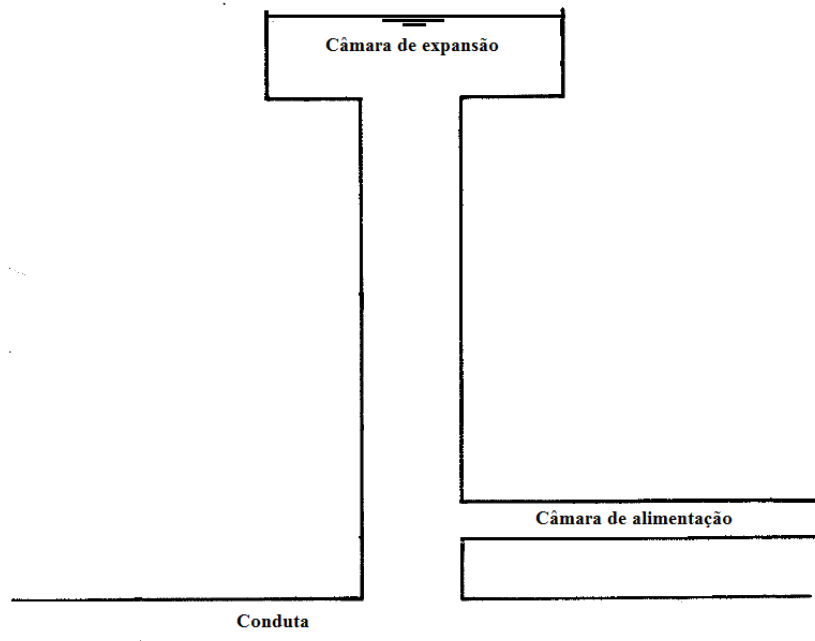


Figura 4.4 – Esquema de uma chaminé com câmaras

Nas figuras 4.5 a 4.7 estão representadas as variações da cota piezométrica na secção imediatamente a montante da chaminé, considerando respectivamente uma chaminé com câmara de expansão, de alimentação e com duas câmaras.

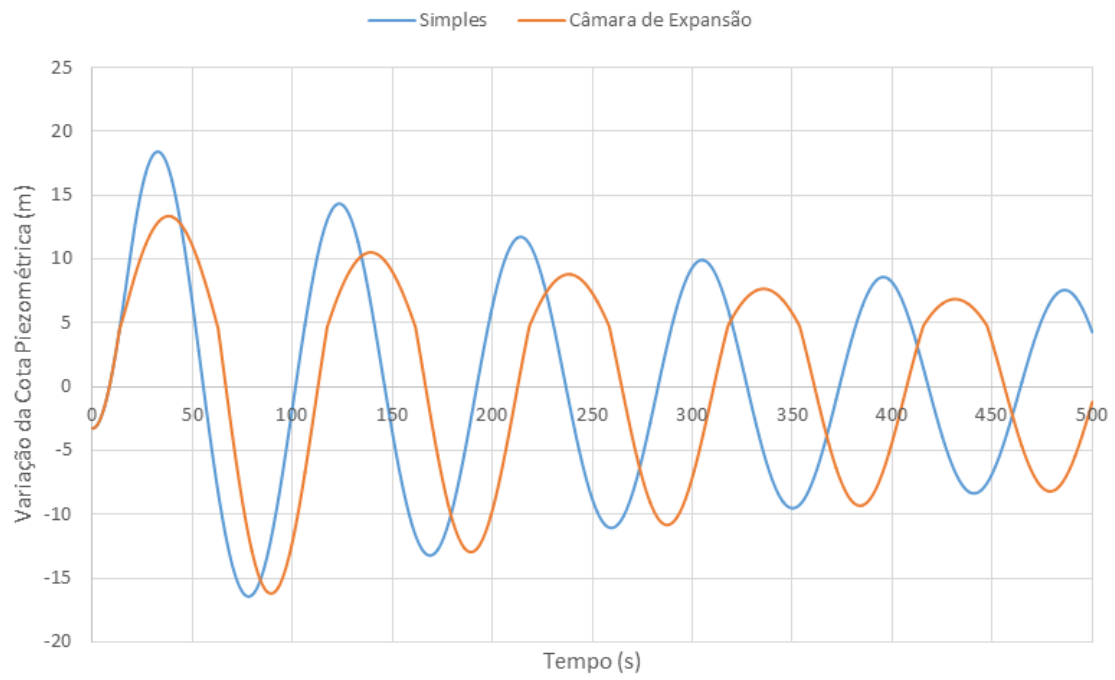


Figura 4.5 - Variação da cota piezométrica, chaminé simples e com câmara de expansão

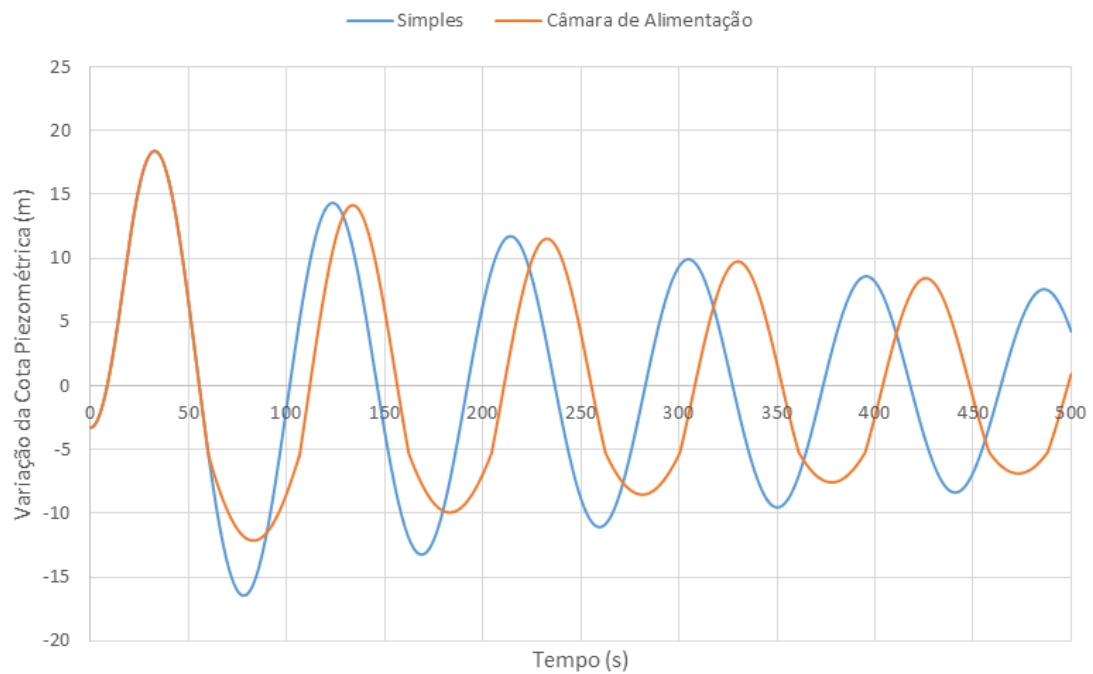


Figura 4.6 - Variação da cota piezométrica, chaminé simples e com câmara de alimentação

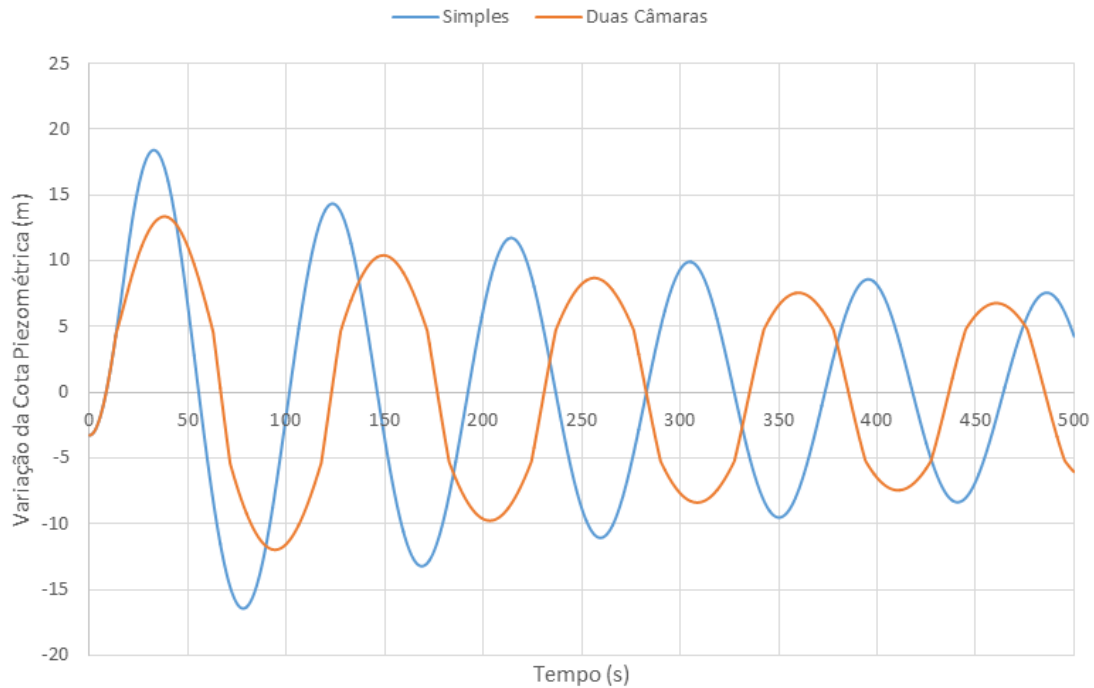


Figura 4.7 - Variação da cota piezométrica, chaminé simples e com câmara de expansão e alimentação

A análise da figura 4.5 permite verificar que a influência da câmara de expansão faz-se notar na fase de sobrepressão pelo contrário, na simulação de uma chaminé com câmara de alimentação, representada na figura 4.6, a influência da câmara só se faz notar na depressão. O amortecimento dos picos de pressão deve-se ao aumento da secção que conduz ao incremento da inércia da chaminé. Esta descontinuidade na secção da chaminé é correspondente a uma descontinuidade na sua inércia e ocorre quando a superfície livre alcança as câmaras. Esta situação provoca o alargamento dos picos da curva correspondente à cota da superfície livre.

A introdução das duas câmaras, cuja resposta se representa na figura 4.7, corresponde à sobreposição das duas situações anteriores permitindo reduzir tanto as sobrepressões como as depressões.

4.4 Influência de uma perda de carga

4.4.1 Perda de carga simétrica

A introdução de uma perda de carga na chaminé tem dois objectivos: o amortecimento das ondas de pressão e a redução dos seus valores extremos. Caso a perda de carga considerada seja muito elevada, a resistência à entrada de caudal na chaminé é grande. Nesta situação a eficiência da chaminé reduz-se, no limite o sistema comporta-se como se não existisse chaminé de equilíbrio.

Interessa assim determinar a partir de que valores o aumento da perda de carga começa a ser contraproducente.

Ocorrendo dois efeitos opostos (o aumento da perda de carga provoca uma maior dissipação da energia e um menor efeito de inércia devido à redução de entrada de caudal para a chaminé) existe um valor óptimo para a perda de carga.

Para a determinação deste valor foi considerado o caso em que existe um orifício na base da chaminé, situação descrita na equação 2.83. A perda de carga é função de $C_D A_o$ pelo que são realizadas simulações para otimizar o valor de $C_D A_o$ que implica a maior redução dos valores extremos da pressão. Nas figuras 4.8 a 4.18 representa-se a variação da cota piezométrica na secção imediatamente a montante da chaminé à medida que se procede a um aumento gradual de $C_D A_o$ (o que corresponde a uma diminuição da perda de carga).

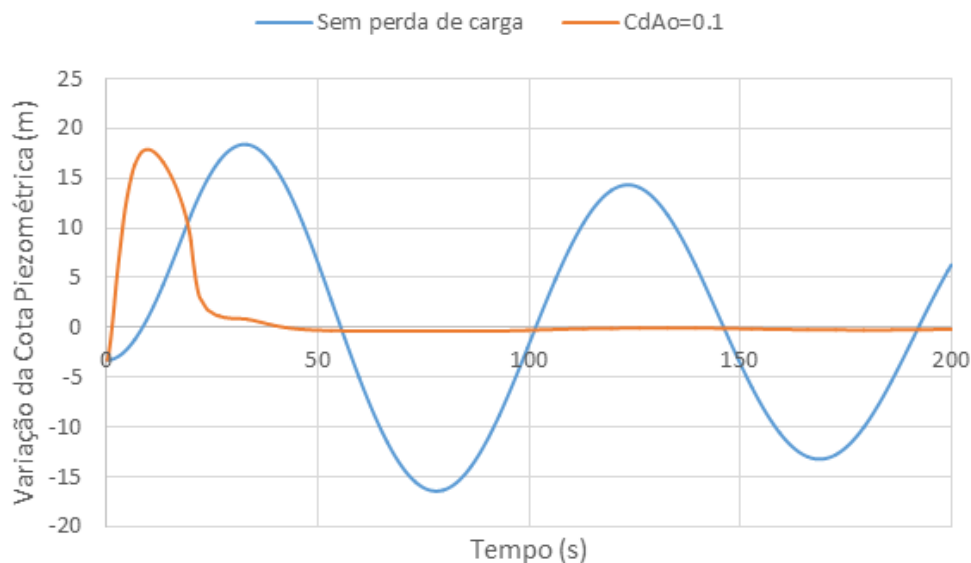


Figura 4.8 - Variação da cota piezométrica para $C_D A_o = 0,1$

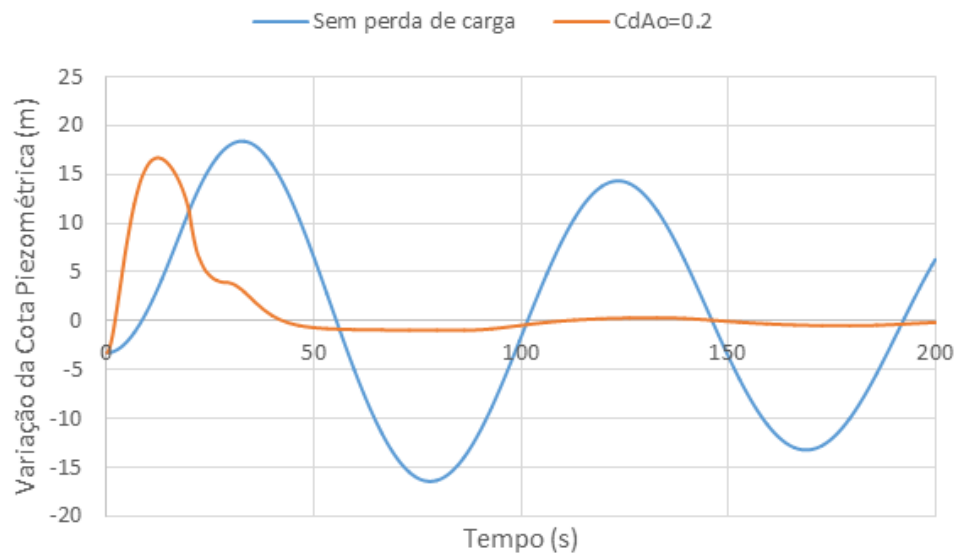


Figura 4.9 - Variação da cota piezométrica para $C_D A_o = 0,2$

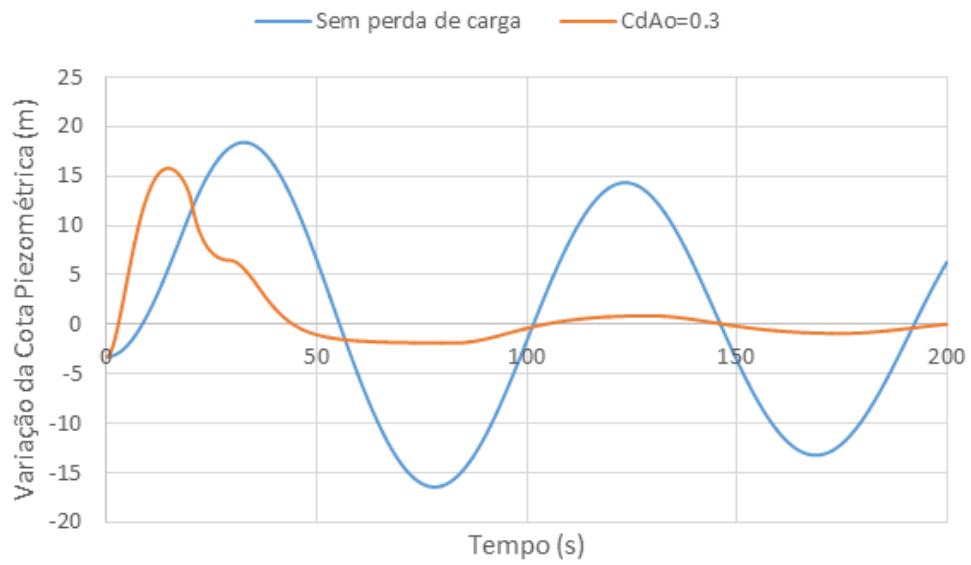


Figura 4.10 - Variação da cota piezométrica para $C_D A_o = 0,3$

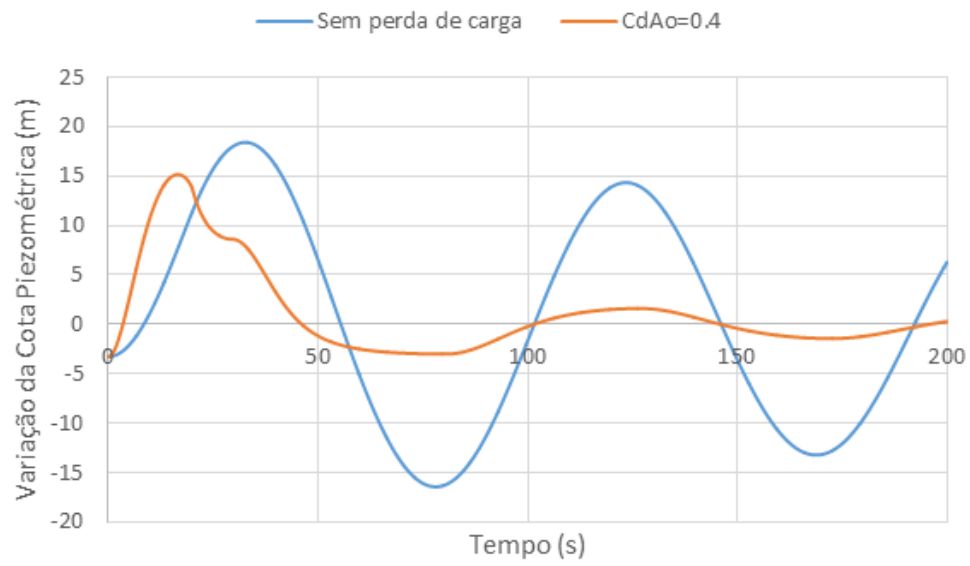


Figura 4.11 - Variação da cota piezométrica para $C_d A_o = 0,4$

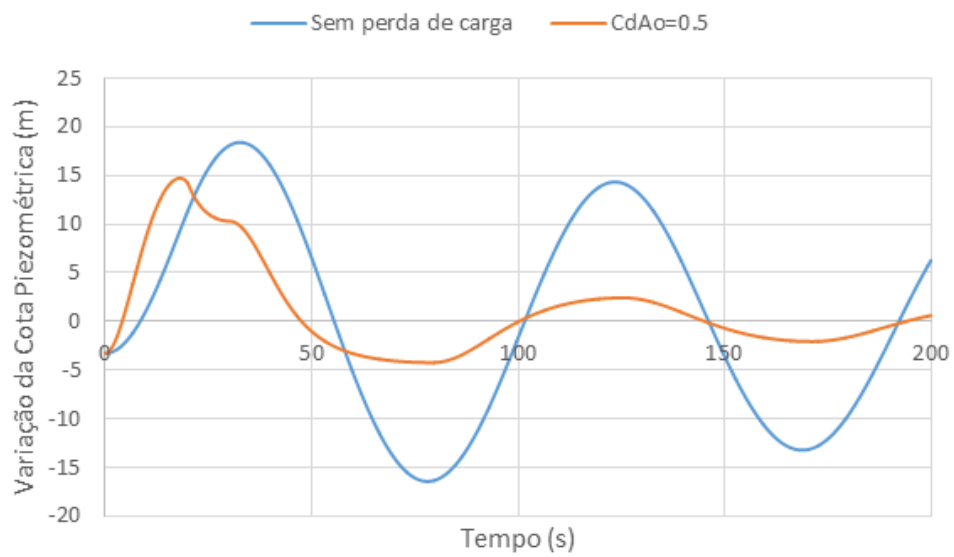


Figura 4.12 - Variação da cota piezométrica para $C_d A_o = 0,5$

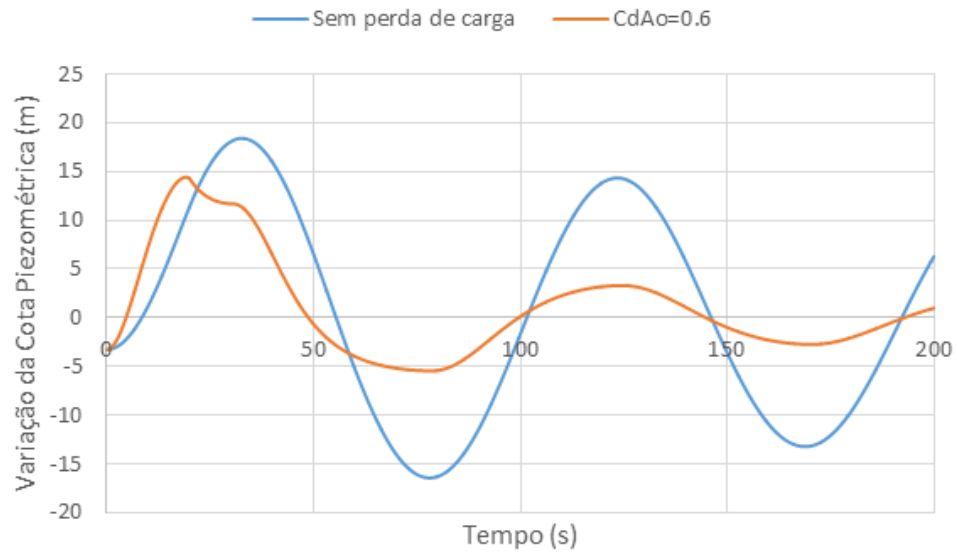


Figura 4.13 - Variação da cota piezométrica para $C_{DAo}=0,6$

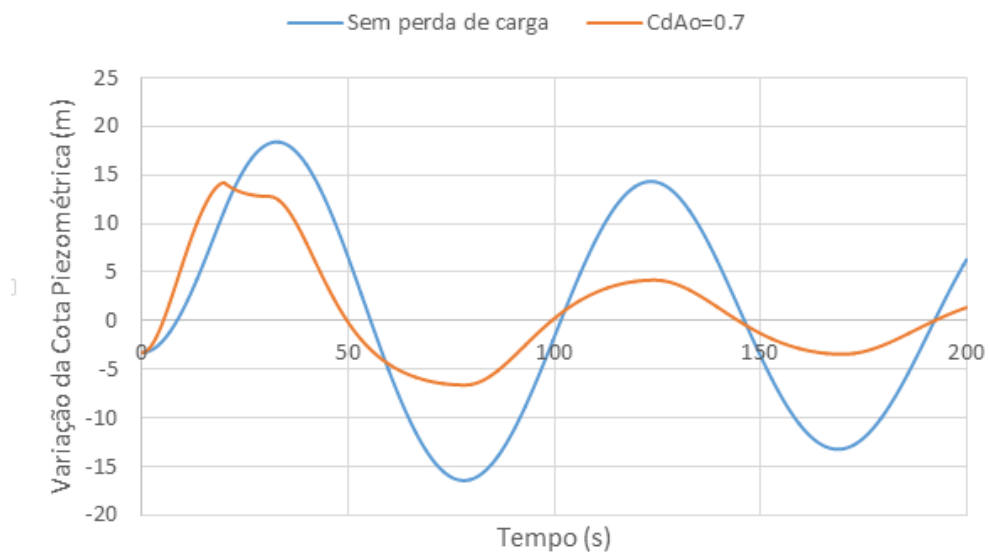


Figura 4.14 - Variação da cota piezométrica para $C_{DAo}=0,7$

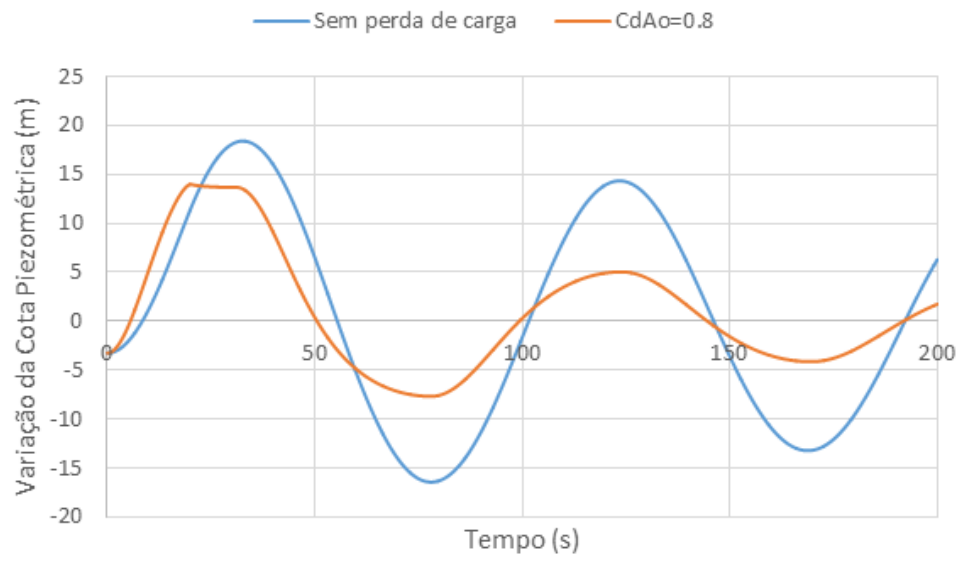


Figura 4.15 - Variação da cota piezométrica para $C_D A_o = 0.8$

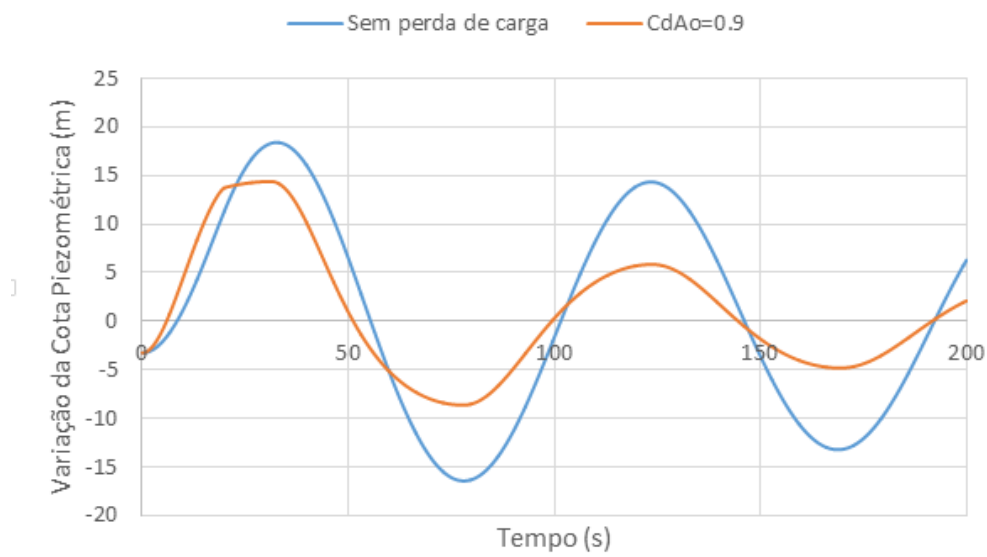


Figura 4.16 - Variação da cota piezométrica para $C_D A_o = 0.9$

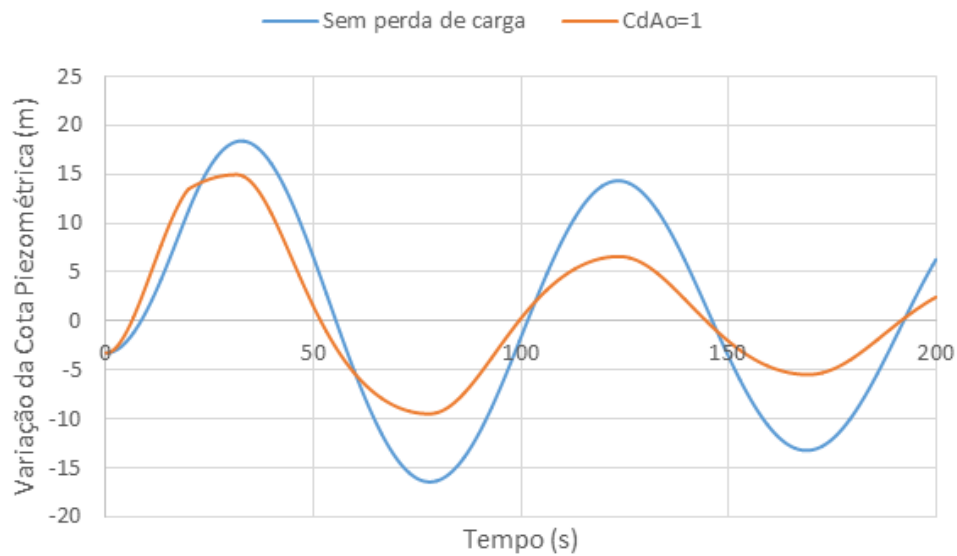


Figura 4.17 - Variação da cota piezométrica para $C_D A_o = 1$

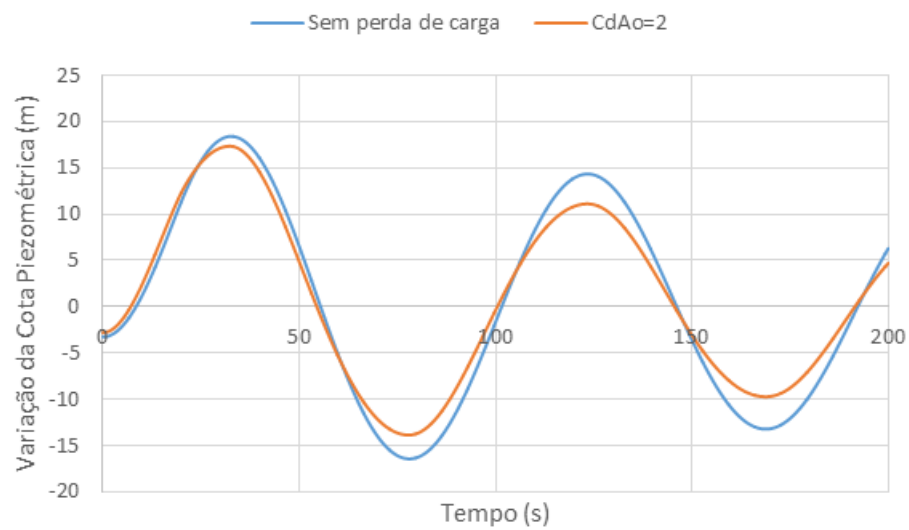


Figura 4.18 - Variação da cota piezométrica para $C_D A_o = 2$

Na figura 4.19 estão representados os valores máximos da variação cota piezométrica alterando a perda de carga do orifício. Pode verificar-se que a máxima redução é atingida considerando,

$$C_D A_o = 0,83 \quad (4.1)$$

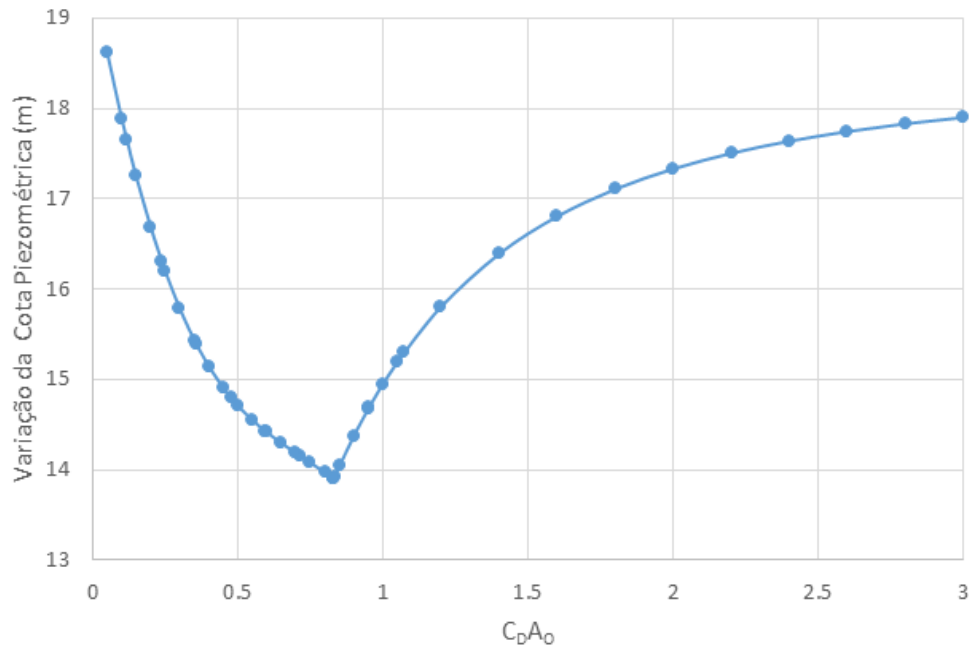


Figura 4.19 - Sobrepressão máxima em função da perda de carga

Através da figura 4.19 obtém-se o valor ótimo de $C_D A_0$ que permite reduzir ao máximo a primeira sobrepressão. Conhecido este valor é possível dimensionar a geometria do orifício recorrendo a expressões empíricas da perda de carga. Segundo Lencastre, a relação entre C_D e o diâmetro d do orifício é dada por [11],

$$\frac{1}{C_D^2} = \left(\frac{D^2}{0.6d^2} - 1 \right)^2 \quad (4.2)$$

Em que D corresponde ao maior diâmetro, neste caso equivalente ao diâmetro da conduta.

Resolvendo o sistema composto pelas equações 4.1 e 4.2, o orifício que otimiza a redução da pressão para esta instalação tem as seguintes dimensões,

$$\begin{aligned} C_D &= 0.37 \\ d &= 1.68 \text{ m} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Na figura 4.20 está representada a evolução da variação da cota piezométrica para a perda de carga acima obtida.

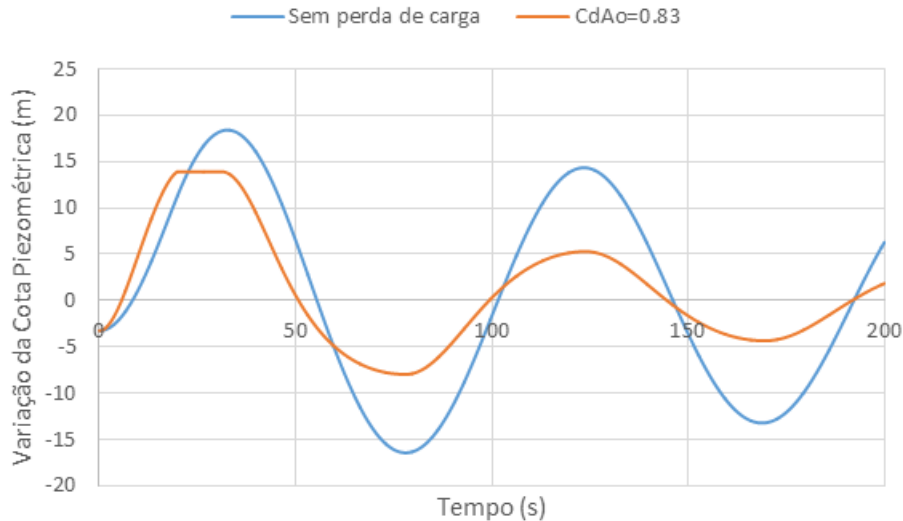


Figura 4.20 – Variação da cota piezométrica para a perda de carga óptima $C_D A_o = 0.83$

A introdução de perda de carga na chaminé permite uma redução de aproximadamente 24% no valor máximo da pressão e também um amortecimento mais rápido das oscilações. Para quantificar o amortecimento estabeleceu-se como critério determinar o tempo necessário para que as amplitudes de oscilação sejam inferiores a dois metros. Representa-se na figura 4.21 o tempo de estabilização para o critério definido em função da perda de carga.

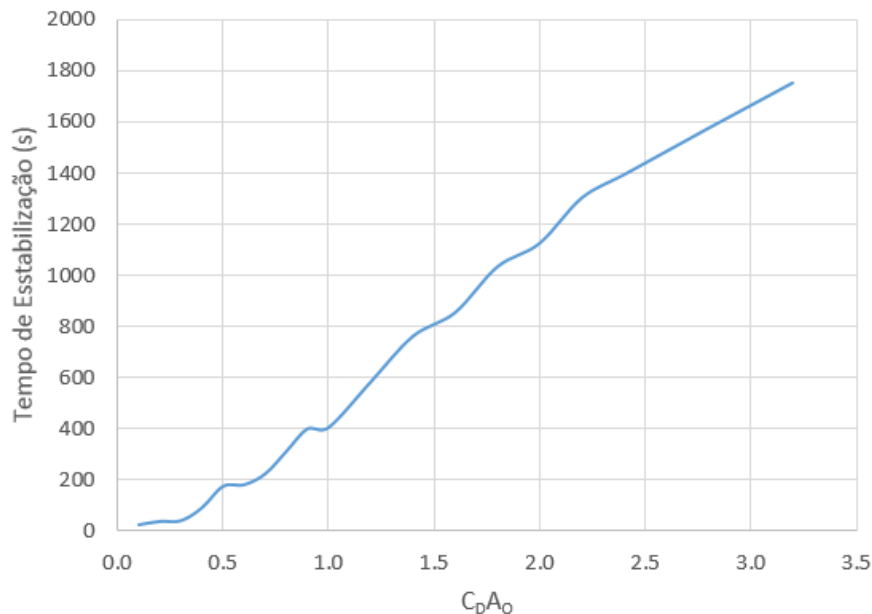


Figura 4.21 - Influência da perda de carga no tempo de estabilização do sistema

Considerando que para uma chaminé de equilíbrio sem perda de carga o tempo correspondente é de 2482 segundos, conclui-se que a introdução de uma perda de carga reduz de forma significativa o tempo de estabilização do sistema. Mesmo para valores de $C_D A_o$ altos, nos quais a sobrepressão inicial é pouco amortecida, a redução no tempo de estabilização é bastante significativa. Para o valor óptimo da perda de carga obtém-se um tempo de estabilização de 323 segundos, o que corresponde a uma redução de aproximadamente 87%. Conclui-se assim que a introdução de uma perda de carga bem dimensionada resulta num apreciável aumento da eficácia da chaminé de equilíbrio.

Solucionado o problema de optimização da perda de carga, interessa agora interpretar o escoamento do ponto de vista físico para melhor compreender a interacção entre os efeitos da dissipação de energia e de oscilação de massa. Para perdas de carga muito elevadas como se pode observar nas figuras 4.8 a 4.11 o efeito dissipativo sobrepõe-se à oscilação de massa. Desta forma o nível da chaminé sobe moderadamente pois parte da energia é dissipada na perda de carga e até o fecho se completar ($t_f = 20\text{ s}$) grande parte do caudal segue para o reservatório a jusante. Quando a válvula termina a sua manobra o sistema apenas pode apresentar um escoamento resultante da oscilação em massa. Sendo a perda de carga grande, a energia acumulada na chaminé dissipa-se no orifício evitando assim o movimento oscilatório. Da figura 4.11 a 4.18 são facilmente identificados dois picos iniciais que correspondem o primeiro à sobrepressão causada pelo fecho e respectivo aumento de cota da chaminé e o segundo ao escoamento provocado pela deslocação de massa da chaminé para o reservatório a montante. Quando estes dois efeitos têm intensidades semelhantes a curva apresenta um patamar a que corresponde o valor óptimo da perda de carga. Este patamar é portanto bem definido para a perda de carga óptima, como é visível na figura 4.20.

4.4.2 Perda de carga assimétrica

Determinada a perda de carga que optimiza a redução do primeiro pico de pressão, pode-se agora considerar a introdução de uma perda de carga assimétrica com o objectivo de reduzir o valor máximo da depressão. Desta forma fixa-se a perda de carga com o valor óptimo para a entrada na chaminé e optimiza-se o seu valor para a saída.

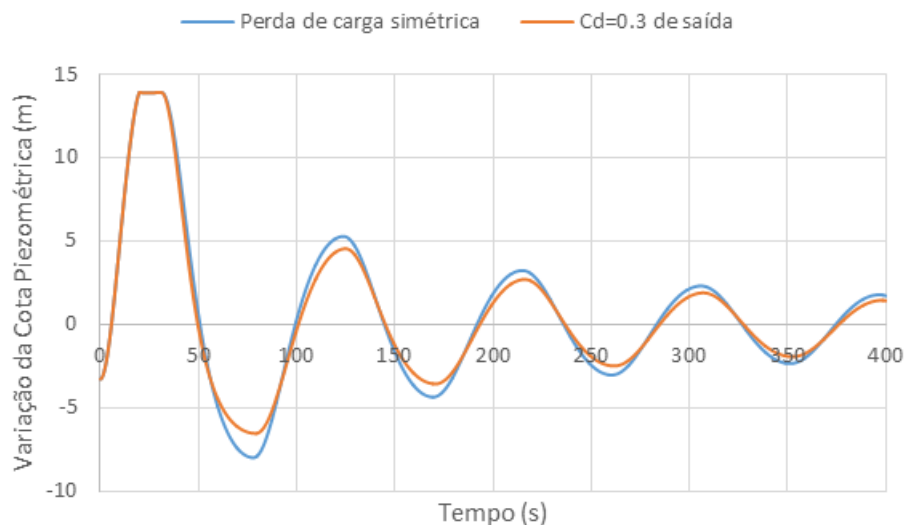


Figura 4.22 - Variação da cota piezométrica para perda de carga assimétrica com $C_d=0.3$ de saída

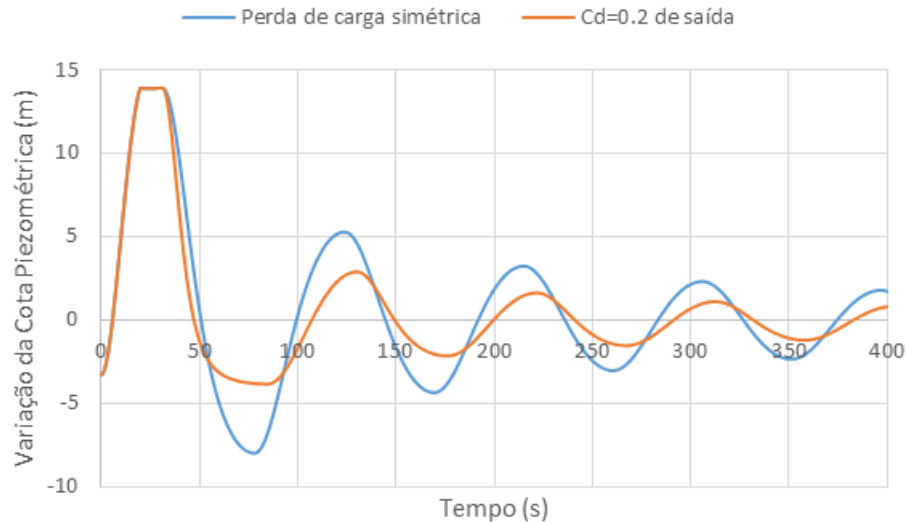


Figura 4.23 - Variação da cota piezométrica para perda de carga assimétrica com $C_D=0.2$ de saída

Pela análise das figuras 4.22 e 4.23 verifica-se que à medida que é aumentada a perda de carga à saída, a depressão é cada vez menor. Na figura 4.24 representa-se a cota piezométrica correspondente à depressão máxima em função da perda de carga.

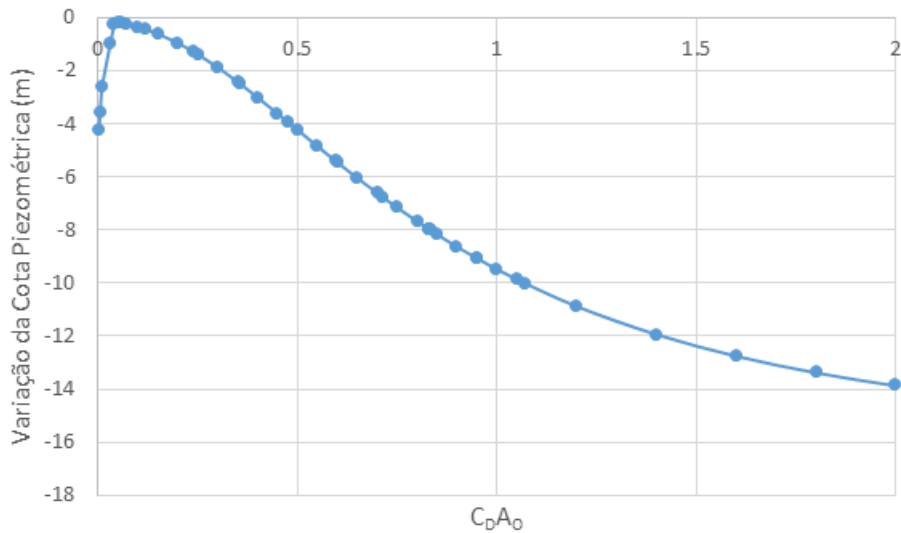


Figura 4.24 - Depressão máxima em função da perda de carga

Como se identifica na figura 4.24 a perda de carga não pode ser aumentada infinitamente. O que corresponde à situação em que a chaminé apenas aceitaria a entrada do escoamento e não permitiria a sua saída. Se tal acontecesse ocorreria uma situação semelhante a um segundo golpe de ariete, uma vez que como o escoamento não teria possibilidade de sair da chaminé. Este efeito seria equivalente a um fecho instantâneo no final da primeira sobrepressão de uma válvula situada na saída da chaminé.

Pela análise da figura 4.24 é possível identificar o valor de perda de carga que maximiza o amortecimento da depressão. O orifício óptimo caracteriza-se então por possuir uma perda de carga assimétrica,

$$C_D = 0.37 \text{ à entrada}$$

$$C_D = 0.05 \text{ à saída}$$

$$d = 1.68 \text{ m}$$

Na figura 4.25 está representada a evolução da cota piezométrica considerando a optimização da perda de carga assimétrica, observa-se que a conduta apenas esta sujeita à primeira sobrepressão sendo que de seguida as variações de pressão são totalmente absorvidas.

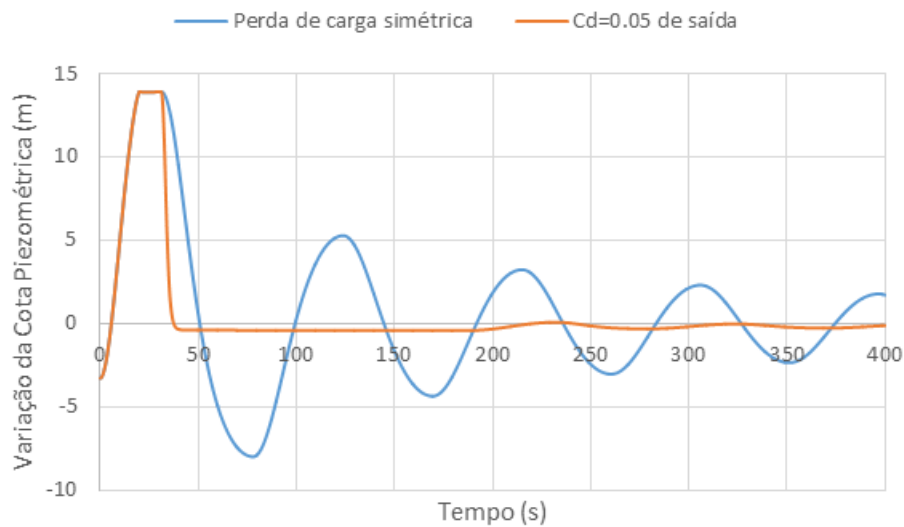


Figura 4.25 - Variação da cota piezométrica para uma perda de carga assimétrica ótima

O método proposto permite determinar os valores óptimos da perda de carga recorrendo a um conjunto de simulações e assim dimensionar o sistema hidráulico. No que diz respeito à perda de carga à saída, a adopção do valor óptimo determinado pode revelar-se na prática desvantajosa pois uma pequena variação no seu valor pode conduzir a uma depressão muito intensa. Tal facto justifica-se pela variação abrupta à esquerda do valor óptimo identificável na figura 4.24. A escolha da perda de carga deve então ser feita introduzindo alguma segurança, o que equivale a aumentar o valor de C_D .

5 Conclusões

Tal como referido na introdução, o objectivo deste trabalho foi o estudo do comportamento dinâmico de uma chaminé de equilíbrio durante o regime transitório provocado pela manobra de uma válvula.

O primeiro e o segundo capítulo consistiram numa revisão bibliográfica que permitiu conhecer os estudos previamente realizados não só relativos aos regimes transitórios mas também às chaminés de equilíbrio. Também no segundo capítulo foi feita uma revisão do método de cálculo utilizado pelo código numérico para assim ser possível interpretar os resultados obtidos nas simulações.

De seguida procedeu-se à validação de procedimentos do código numérico, inicialmente através da comparação de simulações simples com soluções analíticas conhecidas. Na simulação de um sistema equipado com uma chaminé e considerando-se atrito nas condutas as simulações numéricas foram comparados com resultados publicados por outro autor.

O estudo numérico da influência da variação da secção transversal permitiu constatar que as dimensões da chaminé têm de ser escolhidas recorrendo a um critério económico. Apesar do aumento da área contribuir inequivocamente para a redução das oscilações, observa-se que a taxa de redução diminui com o aumento do diâmetro o que poderá não compensar o correspondente aumento de custo de construção.

Seguidamente simularam-se chaminés com câmaras de alimentação e de expansão. A introdução destes dispositivos permite reduzir os valores extremos da sobrepressão e da depressão. As câmaras de alimentação e de expansão são muitas vezes resultado da reutilização de túneis abertos durante a fase de construção da barragem pelo que esta solução pode ser uma excelente opção relativamente à construção de uma chaminé de secção superior.

Os resultados obtidos nas simulações numéricas relativas a chaminés com perda de carga permitiram desenvolver uma metodologia capaz de identificar o valor óptimo da respectiva perda de carga. De igual forma foi possível determinar o valor da perda de carga assimétrica que optimiza a maior depressão do regime transitório.

Com a experiência obtida neste trabalho propõe-se uma metodologia de forma a dimensionar correctamente uma chaminé de equilíbrio:

1. Inicialmente efectuem-se simulações numéricas para verificar a dependência dos valores máximos da pressão em função da área transversal da chaminé. Identificada a zona onde esta dependência começa a ser fraca elege-se um valor de diâmetro para pré-projecto.
2. Se os factores construtivos permitem a utilização de câmaras estas são acopladas à chaminé determinando os seus efeitos na redução da sobrepressão e depressão.
3. Introduce-se perda de carga e realizando um conjunto de simulações numéricas determina-se o seu valor óptimo. Se necessário introduz-se uma perda de carga assimétrica optimizando o seu valor por identificação do mínimo da depressão.

O método proposto não apresenta quaisquer hipóteses simplificativas no que diz respeito ao tipo de fecho, ausência de efeitos dissipativos pelo que é de utilização mais generalista que os ábacos e expressões analíticas classicamente utilizadas.

No que diz respeito a desenvolvimentos futuros sugere-se a modelação numérica de uma turbina durante o regime transitório para poder simular realisticamente muitas das manobras quotidianas em centrais hidroeléctricas.

Por outro lado a obtenção de dados experimentais permitiria constatar as consequências das aproximações feitas no desenvolvimento do método das características e respectivas condições fronteira.

Do ponto de vista pessoal, este trabalho constituiu uma oportunidade para desenvolver a minha formação na área da hidráulica, mais precisamente no estudo de regimes transitórios.

6 Bibliografia

- [1] C. PIMENTEL, "O Efeito de Sobrepressões em Conduitas. Modelação da Sua Redução Através da Utilização de Válvulas de Escape," Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.
- [2] M. H. CHAUDHRY, "Applied Hydraulic Transients", 3ª ed., Springer, 2014.
- [3] P. A. SILVA, "Amortecimento da celeridade de onda em condutos forçados," Tese de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- [4] J. MARTINS, "Comportamento Dinâmico de Sistemas Elevatórios," Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009.
- [5] J. PARMAKIAN, "Waterhammer Analysis," Dover Publications, Inc., New York, 1963.
- [6] CORREIA, J., "Oscilação em Massa e Estabilidade Hidráulica de Sistemas Complexos de Chaminés de Equilíbrio," Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2014.
- [7] D. LOUSA, "Estudo do Comportamento Dinâmico de um Reservatório Hidropneumático," Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Monte da Caparica, 2011.
- [8] G. RICH, "Hydraulic Transients", 2ª ed., New York, Dover, 1963.
- [9] A. EL-TURKI, "Modeling of Hydraulic Transients in Closed Conduits," Tese de Mestrado, Colorado State University, Colorado, 2013.
- [10] C. JAEGER, "Fluid Transients in Hydro-electric Engineering Practice", Glasgow: Blackie, 1977.
- [11] A. LENCASTRE, "Hidráulica Geral", Lisboa, 1996.

- [12] WYLIE, E. B. e STREETER, V. L., "Fluid Transients", New York: McGraw-Hill, 1977.
- [13] AFSHAR, M., ROHANI, M. e TAHERI, R., "Simulation of transient flow in pipeline systems due to load rejection and load acceptance by hydroelectric powerplants," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. I, 2010.
- [14] J. MACEDO, "Avaliação do Funcionamento e Dimensionamento Hidráulico de Chaminés de Equilíbrio em Aproveitamentos Hidroelétricos," Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2012.